



**UNIVERSIDAD DE CUENCA**  
FACULTAD DE INGENIERIA  
CARRERA DE INGENIERIA CIVIL

**EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES HIDRÁULICAS EN ESTEROS Y CANALES MEDIANTE  
MODELAMIENTO HIDRODINÁMICO 1D Y 2D.**

Trabajo de titulación previo a la  
obtención del título de Ingeniero Civil

**Director:**

Ing. Felipe Eduardo Cisneros Espinoza, Ph. D  
C.I. 0101045540

**Autores:**

Jairo Leonardo Aguilar Sarmiento  
C.I. 0103860680  
Marcelo Eduardo Patiño Jara  
C.I. 0105356562

Cuenca – Ecuador

2017

## RESUMEN

La modelación numérica del flujo en ríos y estuarios es de gran importancia para evaluar sitios vulnerables a inundaciones y zonas de riesgo. El área de estudio se encuentra en el cantón Durán en la Provincia del Guayas. En la temporada de invierno las inundaciones provocan afectación a sus habitantes, especialmente en las clases más vulnerables. En este proyecto, se prevé la construcción de 8 modelos numéricos tomando como base la información topográfica disponible con el fin de obtener 8 modelos hidrodinámicos unidimensionales en el modelo HEC-RAS y dos modelos hidrodinámicos bidimensionales en el modelo IBER. En HEC-RAS e IBER, se asignaron las rugosidades del terreno según el uso de suelo y se ingresaron las condiciones de borde tanto aguas arriba como aguas abajo. El objetivo de este proyecto fue evaluar las condiciones hidráulicas de los esteros y canales mediante el modelamiento matemático del flujo usando los modelos HEC-RAS en 1-D e IBER en 2-D a fin de determinar, las velocidades, niveles de flujo en cada uno de los esteros y canales. Además, en base a los resultados de la modelación matemática se obtuvieron mapas de inundación para caudales de crecida de 5, 25 y 100 años, los cuales nos permitieron identificar sitios propensos a inundaciones y zonas de riesgo. De este modo, se aportó con soluciones a esta problemática, actualizando la información existente, estableciendo áreas con diferentes niveles de amenaza de inundación por el desbordamiento del cauce, estableciendo obras de prevención y disminución de riesgos de inundaciones.

Palabras clave: modelo numérico, mapas de inundación, HEC-RAS, IBER, canales, esteros.

---

**ABSTRACT**

The numerical modeling of the flow in rivers and estuaries is of great importance to evaluate sites vulnerable to floods and areas of risk. The study area is in the Duran county in the Province of Guayas. In the winter season the floods cause affectation to its inhabitants, especially in the most vulnerable classes. In this project, the construction of 8 numerical models is planned based on the available topographic information to obtain 8 one-dimensional hydrodynamic models in the HEC-RAS model and two two-dimensional hydrodynamic models in the IBER model. In HEC-RAS and IBER, the rugosities of the land were assigned according to the land use and the border conditions were entered both upstream and downstream. The objective of this project was to evaluate the hydraulic conditions of the marshes and channels through the mathematical modeling of the flow using the HEC-RAS models in 1-D and IBER in 2-D to determine the speeds, flow levels in each one of the estuaries and channels. In addition, based on the results of the mathematical modeling, flood maps were obtained for flood flows of 5, 25 and 100 years, which allowed us to identify sites prone to flooding and areas of risk. In this way, it was provided with solutions to this problem, updating the existing information, establishing areas with different levels of flood threat due to overflow of the riverbed, establishing prevention works and reduction of flood risks.

Keywords: numerical model, flood map, HEC-RAS, IBER, channels, marshes.



## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	2
1. CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN .....	15
1.1 Antecedentes.....	15
1.2 Alcance.....	16
1.3 Objetivos.....	17
1.3.1 Objetivo General .....	17
1.3.2 Objetivos Específicos.....	17
2. CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO .....	18
2.1 Flujo de canales abiertos.....	18
2.1.1 Tipos de flujo .....	18
2.1.2 Estados de flujo .....	19
2.1.3 Distribución y medición de velocidades .....	20
2.2 Morfología Fluvial .....	21
2.2.1 Erosión.....	21
2.2.2 Transporte .....	21
2.2.3 Sedimentación .....	22
2.2.4 Clasificación.....	22
3. CAPITULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS .....	24
3.1 Descripción del proyecto .....	24
3.1.1 Área de estudio.....	24
3.1.2 Áreas de drenaje .....	25
3.1.3 Morfología de los canales naturales y artificiales a ser analizados .....	26
3.1.4 Topografía .....	28
3.1.5 Hidrología .....	28
3.1.6 Ocupación del suelo .....	29
3.2 Implementación del modelo 1-D.....	30
3.2.1 Ecuaciones hidrodinámicas .....	31
3.2.2 Esquema numérico .....	31
3.2.3 Construcción de la geometría de los esteros naturales y canales artificiales .....	31
3.2.4 Asignación de rugosidades al terreno.....	33
3.2.5 Condiciones de borde del modelo .....	33
3.3 Implementación del modelo 2-D.....	33
3.3.1 Ecuaciones básicas .....	34





3.3.2	Esquema numérico .....	35
3.3.3	Construcción del modelo .....	37
3.3.4	Asignación de rugosidades al terreno .....	37
3.3.5	Condiciones de borde del modelo .....	38
3.3.6	Validación de los modelos 1-D y 2-D .....	38
4.	CAPITULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	39
4.1	RESULTADOS .....	39
4.1.1	Modelo HEC-RAS .....	39
4.1.2	Modelo IBER .....	61
4.2	DISCUSIÓN .....	64
4.2.1	Evaluación de zonas de riesgos de inundaciones .....	64
4.2.2	Validación y comparación de los modelos en 1-D y 2-D para la generación de mapas de inundación. 67	
4.2.3	Alternativas para el adecuado funcionamiento del sistema hidráulico de los esteros La Uruguaya y San Enrique 1 .....	69
5.	CAPITULO 5: CONCLUSIONES .....	72
5.1	RECOMENDACIONES .....	73
6.	REFERENCIAS .....	74
	ANEXOS .....	76
	Anexo A: Secciones transversales para el modelo unidimensional. ....	76
	Anexo B: Velocidades de los esteros La Uruguaya y San Enrique 1 en el modelo bidimensional .....	79

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Curvas comunes de igual velocidad en diferentes secciones de canal (Chow, 1994). .....	20
Figura 2-2. Clasificación de ríos según su forma (Sánchez & Maza, 1985).....	22
Figura 3-1. Mapa de ubicación de la zona de estudio (PROMAS, 2016).....	24
Figura 3-2. Mapa de áreas de aporte de los 8 esteros del cantón Durán. ....	25
Figura 3-3. Mapa de esteros principales y canales tributarios. Longitud total de 115 km aproximadamente. ....	27
Figura 3-4. Mapa de uso de suelo del cantón Durán (PROMAS, 2016). ....	30
Figura 3-5. Secciones transversales del estero El Hospital para el modelo unidimensional. ....	32
Figura 3-6. Sección transversal del estero El Hospital en la abscisa 2+665,81 m.....	32
Figura 4-1. Perfil longitudinal de cauce principal del estero La Uruguaya. Perfiles longitudinales para un caudal medio de invierno y caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años. ....	39
Figura 4-2. Sección transversal del cauce principal en la abscisa 1+400 m. Perfiles transversales para el caudal medio de invierno y caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años. ....	40
Figura 4-3. Distribución de velocidades en el cauce principal del estero La Uruguaya para el caudal medio de invierno. Sección transversal en la abscisa 1+400. ....	40
Figura 4-4. Mapa de inundación del estero La Uruguaya con caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años. ....	41
Figura 4-5. Fotografía del cauce principal del estero El Hospital. ....	42
Figura 4-6. Perfil longitudinal del cauce principal del estero El Hospital. Perfiles para un caudal medio de invierno y caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años. ....	42
Figura 4-7. Sección transversal del cauce principal del estero El Hospital en la abscisa 1+800 m. Perfiles transversales para el caudal medio de invierno y caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años. ....	43
Figura 4-8. Distribución de velocidades en el cauce principal del estero El Hospital para el caudal medio de invierno. Sección transversal en la abscisa 1+800 m. ....	43
Figura 4-9. Mapa de inundación del estero el Hospital con caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años. ....	44
Figura 4-10. Fotografía del cauce principal del estero Peñón del Río. ....	44
Figura 4-11. Perfil longitudinal del cauce principal del estero Peñón del Río. Perfiles para un caudal medio de invierno y caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años. ....	45
Figura 4-12. Sección transversal del cauce principal del estero Peñón del Río en la abscisa 7+900 m. Perfiles transversales para el caudal medio de invierno y caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años. ....	45
Figura 4-13. Distribución de velocidades en el cauce principal del estero Peñón del Río para el caudal medio de invierno. Sección transversal en la abscisa 7+900 m. ....	46
Figura 4-14. Mapa de inundación del estero Peñón del Río con caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años. ....	46
Figura 4-15. Fotografía del cauce principal del estero Don Camilo. ....	47
Figura 4-16. Perfil longitudinal del cauce principal 1 del estero Don Camilo. Perfiles para un caudal medio de invierno y caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años.....	47
Figura 4-17. Sección transversal del cauce principal 1 del estero Don Camilo en la abscisa 4+800 m. Perfiles transversales para el caudal medio de invierno y caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años. ....	48

Figura 4-18. Distribución de velocidades en el cauce principal 1 del estero Don Camilo para el caudal medio de invierno. Sección transversal en la abscisa 4+800 m. ....	48
Figura 4-19. Mapa de inundación del estero Don Camilo con caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años .....	49
Figura 4-20. Perfil longitudinal del cauce principal del estero La Matanza. Perfiles para el caudal medio de invierno y caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años. ....	50
Figura 4-21. Sección transversal del cauce principal del estero La Matanza en la abscisa 7 + 991.64 m. Perfiles transversales para el caudal medio de invierno y caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años. ....	50
Figura 4-22. Distribución de velocidades en el cauce principal del estero La Matanza para para el caudal medio de invierno. sección transversal en la abscisa 5 + 991.63 m. ....	51
Figura 4-23. Mapa de inundación del estero La Matanza con caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años .....	51
Figura 4-24. Perfil longitudinal del cauce principal del estero Las Alforjas. Perfiles para el caudal medio de invierno y caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años. ....	52
Figura 4-25. Sección transversal del estero principal, abscisa 2 + 097.79 m Perfiles para los caudales medio de invierno y caudales de periodos de retorno de 5, 25 y 100 años. ....	52
Figura 4-26. Distribución de velocidades en el cauce principal del estero Las Alforjas para el caudal medio de invierno. sección transversal en la abscisa 2 +097.79 m. ....	53
Figura 4-27. Mapa de inundación del estero Las Alforjas con caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años .....	53
Figura 4-28. Fotografía del cauce principal del estero San Enrique. ....	54
Figura 4-29. Perfil longitudinal del cauce principal del estero San Enrique 1. Perfiles para el caudal medio de invierno y caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años. ....	54
Figura 4-30. Sección transversal del estero principal, abscisa 6 + 432.90 m. Perfiles para los caudales medio mensual de invierno y caudales de periodos de retorno de 5, 25 y 100 años. ....	55
Figura 4-31. Distribución de velocidades en el cauce principal del estero San Enrique 1 para el caudal medio de invierno. Sección transversal en la abscisa 6+ 432.90 m. ....	55
Figura 4-32. Mapa de inundación del estero San Enrique 1 con caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años .....	56
Figura 4-33. Perfil longitudinal del cauce principal del estero San Enrique 2. Perfiles para el caudal medio de invierno y caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años. ....	56
Figura 4-34. Sección transversal del estero principal, abscisa 4 + 365.40 m. Perfiles para los caudales medio mensual de invierno y caudales de periodos de retorno de 5, 25 y 100 años. ....	57
Figura 4-35. Distribución de velocidades en el cauce principal del estero San Enrique 2, para para el caudal medio de invierno. sección transversal en la abscisa 4 + 365.40 m. ....	57
Figura 4-36. Mapa de inundación del estero Las Alforjas con caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años. ....	58
Figura 4-37. Perfil longitudinal del cauce principal del estero La Mercedita. Perfiles para el caudal medio de invierno y caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años. ....	59
Figura 4-38. Sección transversal del estero principal, abscisa 9 + 350.09 m. Perfiles para los caudales medio mensual de invierno y caudales de periodos de retorno de 5, 25 y 100 años. ....	59
Figura 4-39. Distribución de velocidades en el cauce principal del estero La Mercedita, para para el caudal medio de invierno. sección transversal en la abscisa 9 + 350.09 m. ....	60
Figura 4-40. Mapa de inundación del estero La Mercedita con caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años .....	60

Figura 4-41. Mapa de inundación del estero La Uruguaya con un caudal de crecida para un periodo de retorno de 5 años. ....	61
Figura 4-42. Mapa de inundación del estero La Uruguaya con un caudal de crecida para un periodo de retorno de 25 años. ....	62
Figura 4-43. Mapa de inundación del estero La Uruguaya con un caudal de crecida para un periodo de retorno de 100 años. ....	62
Figura 4-44. Mapa de inundación del estero San Enrique 1 con un caudal de crecida para un periodo de retorno de 5 años. ....	63
Figura 4-45. Mapa de inundación del estero San Enrique 1 con un caudal de crecida para un periodo de retorno de 25 años. ....	63
Figura 4-46. Mapa de inundación del estero San Enrique con un caudal de crecida para un periodo de retorno de 100 años. ....	64
Figura 4-47. Zonas afectadas por el desbordamiento del cauce en el estero La Uruguaya para un periodo de retorno de 100 años. ....	66
Figura 4-48. Zonas afectadas por el desbordamiento del cauce en el estero San Enrique 1 para un periodo de retorno de 5 años. ....	67
Figura 4-49. Ubicación de diques en el estero La Uruguaya. ....	69
Figura 4-50. Ubicación de diques en el estero San Enrique 1. ....	70
Figura 4-51. Mapa de inundación del estero La Uruguaya con la implementación de diques. ....	71
Figura 4-52. Mapa de inundación del estero San Enrique 1 con la implementación de diques. ....	71

---

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 3-1. Áreas de aporte de los esteros, Las Alforjas, Hospital, Peñón del Río, La Matanza, San Enrique, La Uruguay, Don Camilo y La Mercedita. ....	26
Tabla 3-2. Longitud total de esteros principales y canales artificiales. ....	28
Tabla 3-3. Caudales de crecida por sub áreas y áreas de aporte de los esteros para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años (PROMAS, 2016). ....	28
Tabla 3-4 Coeficientes de rugosidad de Manning en función de la cobertura de uso de suelo. ....	33
Tabla 4-1. Comparación de niveles máximos de flujo obtenidos en HEC-RAS e IBER. ....	68
Tabla 4-2. Comparación de áreas de inundación obtenidos en HEC-RAS e IBER. ....	68
Tabla 4-3. Comparación de niveles máximos de flujo obtenidos en HEC-RAS e IBER. ....	68
Tabla 4-4. Comparación de áreas de inundación obtenidos en HEC-RAS e IBER. ....	68
Tabla 4-5. Descripción de los diques en el estero La Uruguay y San Enrique 1. ....	70

## CLÁUSULA DE LICENCIA Y AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

### Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Jairo Leonardo Aguilar Sarmiento en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Evaluación de las condiciones hidráulicas en esteros y canales mediante modelamiento hidrodinámico 1D y 2D ", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 22 de noviembre de 2017



Jairo Leonardo Aguilar Sarmiento

C.I: 0103860680

## CLÁUSULA DE LICENCIA Y AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

### Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Marcelo Eduardo Patiño Jara en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Evaluación de las condiciones hidráulicas en esteros y canales mediante modelamiento hidrodinámico 1D y 2D", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 22 de noviembre de 2017



---

Marcelo Eduardo Patiño Jara

C.I: 0105356562

## CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL

### Cláusula de Propiedad Intelectual

Jairo Leonardo Aguilar Sarmiento, autor del trabajo de titulación "Evaluación de las condiciones hidráulicas en esteros y canales mediante modelamiento hidrodinámico 1D Y 2D", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 22 de noviembre del 2017



Jairo Leonardo Aguilar Sarmiento

C.I: 0103860680

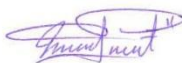


## CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL

### Cláusula de Propiedad Intelectual

Marcelo Eduardo Patiño Jara, autor del trabajo de titulación "Evaluación de las condiciones hidráulicas en esteros y canales mediante modelamiento hidrodinámico 1D Y 2D", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 22 de noviembre del 2017



Marcelo Eduardo Patiño Jara

C.I: 0105356562



---

## DEDICATORIA

“A mis padres, por sus consejos y el apoyo incondicional que me han ayudado a lograr una gran meta”

**Marcelo Patiño J.**

“A mis padres, mis hermanas por brindarme su apoyo y motivarme a ser cada día mejor”

**Jairo Aguilar S.**

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a Dios, por haberme llenado de salud y fortaleza para poder lograr todos mis objetivos esta etapa de mi vida.

A mis padres, por todo el cariño y el apoyo incondicional a lo largo de la carrera, siendo un pilar fundamental en mi vida. A mi familia que siempre estuvo ahí brindándome sus palabras de aliento. A mi abuelita Zoila, por todo su cariño y sabios consejos que me han ayudado a seguir adelante.

Un agradecimiento al personal técnico y administrativo del Programa para el Manejo del Agua y el Suelo (PROMAS), de manera especial al Ing. Felipe Cisneros PhD, por su valiosa guía y asesoramiento para la realización del presente trabajo. Al Ing. Sandro Castro quien nos facilitó todos los materiales y sus conocimientos que permitieron la realización de este trabajo.

A mis amigos (as), con los que he compartido grandes momentos y experiencias que me permitieron crecer como persona.

**Marcelo Patiño J.**

En primer lugar agradecer a Dios por darme la fortaleza para continuar superándome diariamente, y por haberme dado tan maravillosos padres que me educaron de una manera muy acertada para que pueda cumplir las metas que me he propuesto.

A mi director de trabajo de titulación y demás docentes, y de manera muy especial al ingeniero Sandro Castro, que con sus enseñanzas y consejos supo guiarme en mi vida académica.

A mis amigos y compañeros que han sido parte importante a lo largo de mi vida académica., ya que con sus consejos y enseñanzas hemos aprendido a salir adelante en grupo.

**Jairo Aguilar S.**

## 1 CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

El Cantón Durán se encuentra ubicado en la cuenca baja del río Guayas. Debido a su ubicación geográfica, al mal manejo de las cuencas hidrográficas y a la intervención de los cauces sin un previo estudio técnico es muy propenso a inundaciones en épocas de invierno. Por lo tanto, el GAD Municipal del cantón Durán, realiza el estudio para el reordenamiento del sistema de drenaje pluvial en un área de 142 km<sup>2</sup>, con diversos niveles de intervención a lo largo de 115 km de canales naturales (esteros) y canales artificiales.

De acuerdo con la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos, el cantón Durán presenta un alto índice de vulnerabilidad ante las inundaciones. Esto se debe a que las intervenciones en los esteros y canales no fueron consideradas dentro de un análisis técnico que permita encauzar el flujo evitando así la deposición progresiva de sedimentos, basura y maderas. En temporada de invierno las inundaciones provocan pérdidas en el sector agrícola, daños en las viviendas y en general la afectación de sus habitantes, especialmente en las clases más vulnerables.

En el presente trabajo, a partir de una clasificación sistemática de 115 km de canales naturales (esteros) y canales artificiales, se prevé evaluar las condiciones hidráulicas de los esteros y canales del cantón Durán, utilizando modelos hidráulicos. Además, se identificará sitios propensos a inundaciones y zonas de riesgo, con el fin de proponer soluciones para el adecuado funcionamiento del sistema de drenaje de las cuencas de aporte de los esteros y canales del Cantón Durán.

Debido al costo económico que representa construir un modelo físico para cada uno de los 8 esteros que se requiere estudiar, se ha propuesto analizar el comportamiento hidráulico del flujo mediante modelos 1-D y 2-D, con el fin de evaluar los diferentes escenarios del cauce para caudales de periodo de retorno de 5, 25 y 100 años.

Alrededor del mundo hay un creciente interés en la modelación de crecidas de ríos debido a los eventos de inundación extremos ocurridos en la última década. Al ser las inundaciones uno de los riesgos naturales más costosos, su análisis y prevención es un factor clave para las autoridades y organismos relacionados a los recursos hídricos (Castro & Willems, 2011).

El estudio de la hidrodinámica de ríos y estuarios es de gran importancia para entender, predecir y controlar los procesos físicos que tienen lugar en ellos. La dificultad de realizar ensayos de laboratorio, así como el coste económico de llevar a cabo mediciones experimentales en campo, hacen de los modelos numéricos una herramienta muy útil para el estudio de este tipo de problemas. La modelación numérica presenta además la ventaja de poder estudiar los impactos que puede provocar una futura actuación ingenieril, permitiendo la evaluación de diferentes escenarios hipotéticos. Todo ello a un coste temporal y económico relativamente bajo (Cea *et al.*, 2009). La modelación matemática del flujo en canales consiste en predecir los valores que toman las variables hidráulicas (calado, velocidades, caudal, etc.) a partir de la resolución de métodos numéricos de unas ecuaciones obtenidas a partir de una serie de hipótesis (Bladé *et al.*, 2014).

Para el estudio de los efectos de la propagación de las avenidas de ríos y estuarios se pueden utilizar modelos unidimensionales y bidimensionales (Bladé *et al.*, 2014). Según Castro *et al.* (2011) los modelos unidimensionales son ampliamente usados y dan resultados precisos en el cauce principal del río, así como también permite determinar la extensión y los niveles de agua en la llanura de inundación. Los modelos hidrodinámicos

unidimensionales son ampliamente usados, estos modelos están basados en las ecuaciones de Saint Venant (leyes de la conservación de la masa y momento) para calcular la superficie libre de agua para flujo estacionario y no estacionario en canales abiertos. Estas ecuaciones diferenciales parciales se resuelven mediante discretización numérica usando frecuentemente el método de diferencias finitas (Castro & Willems, 2011).

Los modelos hidrodinámicos bidimensionales están basados en las ecuaciones de aguas someras promediadas en la profundidad, también conocidas como ecuaciones de Saint Venant bidimensionales que asumen una escala espacial vertical mucho más pequeña que la escala horizontal, lo cual permite asumir una distribución de presión hidrostática. Al mismo tiempo se asume un campo de velocidad relativamente homogéneo en profundidad. Ambas hipótesis se cumplen de manera razonable tanto en ríos como en zonas litorales, haciendo posible la utilización de modelos de aguas someras para su estudio (Cea *et al.*, 2009).

La necesidad de estudiar fenómenos más complejos, y la observación que en la naturaleza se encuentran muchas situaciones donde el flujo parece ser efectivamente bidimensional, es decir, predominan las dimensiones horizontales sobre la vertical, junto con la creciente capacidad y velocidad de los ordenadores, ha llevado al uso de ecuaciones de aguas someras (E. Bladé *et al.*, 2014).

Cualquier modelo numérico es una representación simplificada de la realidad. En cualquier caso, 1-D o 2-D, los resultados van a depender principalmente de las ecuaciones que se resuelvan (y por tanto de sus hipótesis básicas), del esquema numérico utilizado para resolverlas, de la discretización espacial que se realice, de la geometría, de las condiciones de contorno utilizadas y, como principal parámetro, de la rugosidad del terreno (Bladé, Cea, & Corestein, 2014).

## 1.2 Alcance

En el presente estudio se ha planteado realizar una evaluación hidrodinámica del flujo de los canales naturales (esteros) y artificiales del Cantón Durán. Debido al elevado costo económico que resultaría la construcción de un modelo físico, se pretende realizar una modelación 1-D de 8 esteros y una modelación 2-D para los esteros La Uruguay y San Enrique 1. A partir de la modelación hidráulica, permite tener un mayor acercamiento, y ajuste a la realidad en la generación de mapas de inundación. Los resultados obtenidos a partir de la modelación serán validados mediante una comparación entre modelos 1-D y 2-D de los esteros La Uruguay y San Enrique 1.

Para este trabajo se realiza la modelación hidráulica en 1-D (8 esteros) y 2-D (2 esteros) de los canales naturales y artificiales utilizando las herramientas computacionales HEC-RAS e IBER, para la generación de mapas de inundación, determinación de niveles de agua, velocidades y perfiles de flujo. A partir de estos resultados se identificará sitios y lugares propensos a inundaciones. De este modo, se pretende aportar con soluciones para los esteros La Uruguay y San Enrique 1, con el fin de mejorar la seguridad y el bienestar de la población.

### 1.3 Objetivos

#### 1.3.1 Objetivo General

Evaluar los sistemas de drenaje pluvial y las condiciones hidráulicas existentes de los esteros y canales del cantón Duran mediante modelación matemática.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar los niveles de flujo, sentido y velocidades para diferentes caudales de crecida mediante modelación matemática 1-D y 2-D.
- Identificar sitios propensos a inundaciones y zonas de riesgo por inundación mediante modelación unidimensional en HEC-RAS y bidimensional en IBER.
- Evaluar la efectividad de la modelación contrastando los resultados obtenidos mediante la modelación unidimensional en HEC-RAS y bidimensional en IBER.
- Proponer alternativas para el adecuado funcionamiento del sistema hidráulico de los esteros y canales.

## 2 CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

### 2.1 Flujo de canales abiertos

Se denomina canal abierto al conducto en el cual el agua fluye con una superficie libre. El flujo en un conducto no es necesariamente el flujo en una tubería. Si tiene una superficie libre, puede clasificarse como flujo en canal abierto, debido a que se espera que mantenga una superficie libre la mayor parte del tiempo. De acuerdo con su origen un canal puede ser natural o artificial (Chow, 1994).

Los canales naturales son todos los cursos de agua que existen de manera natural en la tierra como: arroyuelos, arroyos, ríos, quebradas, estuarios de mareas entre otros. Los canales artificiales son aquellos construidos mediante el esfuerzo humano como: canales de navegación, canales y canaletas de irrigación entre otros. El canal artificial por lo general es un canal largo con pendiente suave construido sobre el suelo, que puede ser revestido o no revestido de concreto, cemento, madera o materiales bituminosos (Chow, 1994).

#### 2.1.1 Tipos de flujo

Las condiciones de flujo en canales abiertos están sometidas a cambio debido a la variación espacial y temporal. Existen muchos criterios para clasificar el flujo en canales abiertos. Si se toma como criterio el cambio de la profundidad del flujo con respecto al tiempo, el flujo se clasifica en permanente y no permanente.

El flujo en un canal abierto es permanente si la profundidad del flujo no varía con el tiempo. El flujo es no permanente si la profundidad varía con el tiempo.

Para el flujo permanente se cumple la ecuación de la continuidad entre dos puntos.

$$Q = A_1 * V_1 = A_2 * V_2 = \dots \quad (2-1)$$

Donde:

$Q$ : Caudal o flujo de agua ( $m^3/s$ )

$A$ : Área de la sección transversal del canal en la dirección del flujo ( $m^2$ )

$V$ : Velocidad del flujo ( $m/s$ )

El flujo en un canal abierto es *espacialmente variado* cuando parte del flujo entra o sale del sistema a lo largo del curso del flujo.

Si se toma como criterio el cambio de profundidad del flujo con respecto al espacio, el flujo se clasifica en *uniforme* y *variado*; este tipo de flujo puede ser permanente o no permanente, según cambie o no la profundidad con respecto al tiempo.

El flujo uniforme permanente es el tipo de flujo fundamental que se considera en la hidráulica de canales abiertos, debido a que la profundidad del flujo no cambia durante el intervalo de tiempo. El flujo es variado si la profundidad del flujo cambia a lo largo del canal. Existe una subdivisión del flujo variado según la velocidad de cambio de la profundidad del flujo con respecto a la distancia en la que este cambio se produce, si el cambio de la profundidad se da de manera abrupta a una distancia comparativamente corta el flujo es rápidamente variado. El flujo rápidamente

variado se conoce como un fenómeno local tal como el resalto hidráulico y la caída hidráulica. Si el cambio de profundidad se da a una distancia larga el flujo es gradualmente variado (Chow, 1994).

A continuación, se muestra un resumen de la clasificación del flujo en canales abiertos:

- Flujo permanente
  - Flujo uniforme
  - Flujo variado
    - Flujo gradualmente variado
    - Flujo rápidamente variado
- Flujo no permanente
  - Flujo uniforme no permanente (raro)
  - Flujo no permanente (es decir, flujo variado no permanente)
    - Flujo gradualmente variado no permanente
    - Flujo rápidamente variado no permanente

### 2.1.2 Estados de flujo

El estado o comportamiento del flujo en canales abiertos está gobernado básicamente por los efectos de viscosidad y gravedad en relación con las fuerzas inerciales del flujo. La relación del efecto de la viscosidad con la inercia permite clasificar al flujo en laminar, turbulento o transicional. Si las fuerzas viscosas son más fuertes que las fuerzas inerciales el flujo es laminar, en este tipo de flujo las partículas de agua se mueven en trayectorias suaves o líneas de corriente. Si las fuerzas viscosas son débiles en relación con las fuerzas inerciales el flujo es turbulento, en este tipo de flujo las partículas de agua se mueven en trayectorias irregulares. Entre los estados de flujo laminar y turbulento se genera un estado mixto o transicional (Chow, 1994).

Matemáticamente, el efecto de la viscosidad en relación con la inercia puede representarse mediante el *número de Reynolds*, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (2-2)$$

Donde  $V$  es la velocidad del flujo,  $L$  es la longitud característica la cual es considerada igual al radio hidráulico  $R$  de un conducto; y  $\nu$  es la viscosidad cinemática del agua. El número de Reynolds es un parámetro adimensional cuyo valor es idéntico independientemente del sistema de unidades que se utilice (Chow, 1994).

El flujo en canales abiertos es laminar si el número de Reynolds  $Re$  es pequeño, y turbulento si  $Re$  es grande. Según indica Chow (1994), se ha demostrado mediante varios experimentos que el flujo en tuberías cambia de laminar a turbulento en el rango de  $Re$  entre el valor crítico 2000 y un valor que puede ser tan alto como 50000<sup>3</sup>, a este cambio de estado flujo se lo conoce como transicional.

El *efecto de la gravedad* sobre el estado de flujo se representa por la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales. Esta relación está dada por el *número de Froude*, definido como:

$$F = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (2-3)$$



Donde  $V$  es la velocidad media del flujo en pies/s,  $g$  es la aceleración de la gravedad en pies/s<sup>2</sup> y  $L$  es una longitud característica en pies.

El número de Froude es el efecto de la gravedad sobre el estado de flujo, se representa por la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales. El número de Froude se usa cuando el estado de flujo se desea clasificar en función de la acción que sobre él ejerce la gravedad. Con base en este número es posible distinguir el flujo en tres estados: el flujo crítico, el subcrítico y el supercrítico (Chow, 1994).

Cuando  $F$  es igual a la unidad, la ecuación (2-3) se convierte en:

$$V = \sqrt{gD} \quad (2-4)$$

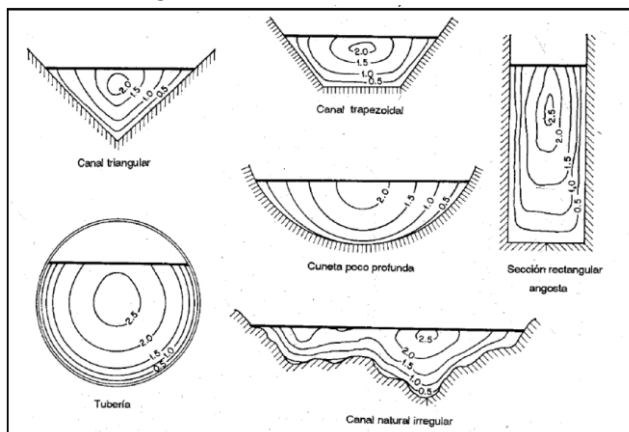
Y se dice que el flujo está en un estado *crítico*. Si  $F$  es menor que la unidad, o  $V < \sqrt{gD}$ , el flujo es *subcrítico*. En este estado el flujo tiene una velocidad baja y menudo se describe como tranquilo y de corriente lenta. Si  $F$  es mayor que la unidad, o  $V > \sqrt{gD}$ , el flujo es *supercrítico*. En este estado las fuerzas inerciales se vuelven dominantes; el flujo tiene una alta velocidad y se describe usualmente como rápido, ultrarrápido y torrencial (Chow, 1994).

### 2.1.3 Distribución y medición de velocidades

Las velocidades en un canal no están uniformemente distribuidas en su sección, la velocidad en las fronteras sólidas es cero, y normalmente va aumentando con la distancia de la frontera. La distribución de las velocidades en una sección de canal depende también de otros factores, como la forma de la sección, la rugosidad del canal y la presencia de curvas (Chow, 1994). En la Figura 2-1 se muestra la distribución de velocidades para diferentes secciones de canal.

La máxima velocidad medida en canales normales a menudo ocurre por debajo de la superficie libre a una distancia de 0.05 a 0.25 de la profundidad. De acuerdo con el procedimiento para el aforo de corrientes del U.S. Geological Survey, la velocidad promedio a lo largo de la línea vertical de la sección de canal se mide por la velocidad a 0.6 de la profundidad o también tomando el promedio de las velocidades a 0.2 y 0.8 de la profundidad, cuando se requieran resultados más confiables (Chow, 1994).

**Figura 2-1. Curvas comunes de igual velocidad en diferentes secciones de canal (Chow, 1994).**



## 2.2 Morfología Fluvial

Se encarga del estudio de la estructura y forma de los ríos, incluyendo la configuración del cauce en planta, la geometría de las secciones transversales, la forma del fondo y las características del perfil. (Sánchez & Maza, 1985). El agua de lluvia que fluye por las pendientes se junta para formar un flujo de corriente. El espacio donde se ejecuta un flujo de corriente es un canal. El área que suministra agua a un canal es una cuenca de drenaje; el límite entre las cuencas de drenaje es una división de agua. Los ríos están compuestos por corrientes principales y varios tributarios (Matsuda, 2004).

Todos los ríos constan de una corriente tanto de agua como de sedimentos, de modo que, el relieve que genera un río no depende solo de las características de la corriente, en especial de su caudal de distribución en el tiempo y de la energía, sino también de la cantidad de sedimentos que arrastre (Sánchez & Maza, 1985). Los principales factores responsables de formación y evaluación de ríos y su modelado son la erosión, transporte y sedimentación.

### 2.2.1 Erosión

La corriente de agua en un canal lleva a cabo dos procesos: uno es la erosión y otro es la corrosión. La erosión es una acción hidráulica y se deriva de la corriente de agua. La grava es traída por la corriente de agua que recorre el canal y remueve los sedimentos del fondo del lecho del río. La erosión hace un canal más amplio y más profundo. Estos procesos también se denominan erosión lateral y profundización de la erosión respectivamente. Si predomina la profundización de la erosión, se forma un cañón. La erosión lateral forma un canal con un lecho del río más ancho. La corriente de agua reacciona químicamente con las rocas y las disuelve, a este proceso se lo llama corrosión (Matsuda, 2004).

Los valles en las montañas pueden ser muy profundos. Los valles profundos se forman no sólo por la corriente agua, sino también por los efectos de la intemperie. Las rocas que componen las laderas han resistido durante un largo período de tiempo, y se convierten en fragmentos de roca o residuos de roca incluyendo otros materiales finos. La gravedad, en combinación con fuertes lluvias, las pendientes, hace que los materiales desgastados caigan en el fondo del valle. Este proceso ocurre aguas abajo del valle retirando el material de las partes altas de las laderas. Los materiales erosionados depositados en el fondo de un valle se limpian con la corriente de agua y son llevados a los tramos bajos del cauce (Matsuda, 2004).

### 2.2.2 Transporte

Cuanto mayor sea la velocidad del agua, mayor será la capacidad de un río para transportar una carga de sedimentos. Hay tres procesos diferentes en el transporte de la carga de sedimentos. Son la corrosión, suspensión y tracción. La corrosión es el proceso en el cual la corriente de agua corroe las rocas y las hace invisibles en solución. Materiales tan finos como arcilla, limo, arena fina y materiales más ligeros que el agua, se transportan en la superficie de agua sin contacto con el lecho del río. A este proceso se lo llama suspensión, y los materiales transportados en suspensión son las cargas suspendidas. La carga suspendida crea la turbidez de la corriente de agua. Las gravas de mayor diámetro se deslizan o ruedan, y la arena salta o se une al lecho del río. A estos procesos se los llama tracción. La carga de sedimentos transportada por la tracción se la conoce como carga de fondo (Matsuda, 2004).

### 2.2.3 Sedimentación

Una inundación causada por una fuerte lluvia lleva un alto volumen de carga de fondo de las montañas a la llanura. Cuando una inundación fluye de las montañas a una llanura, la capacidad de transportar la carga de fondo se reduce repentinamente. Las partículas de la carga de fondo se depositan en orden de su tamaño, y se forma una llanura aluvial. Un abanico aluvial compuesto de grava se forma los tramos superiores de la llanura aluvial. La superficie de un abanico aluvial es como un segmento de un cono. El perfil radial hacia el tramo inferior es cóncavo y el perfil transversal es convexo (Matsuda, 2004).

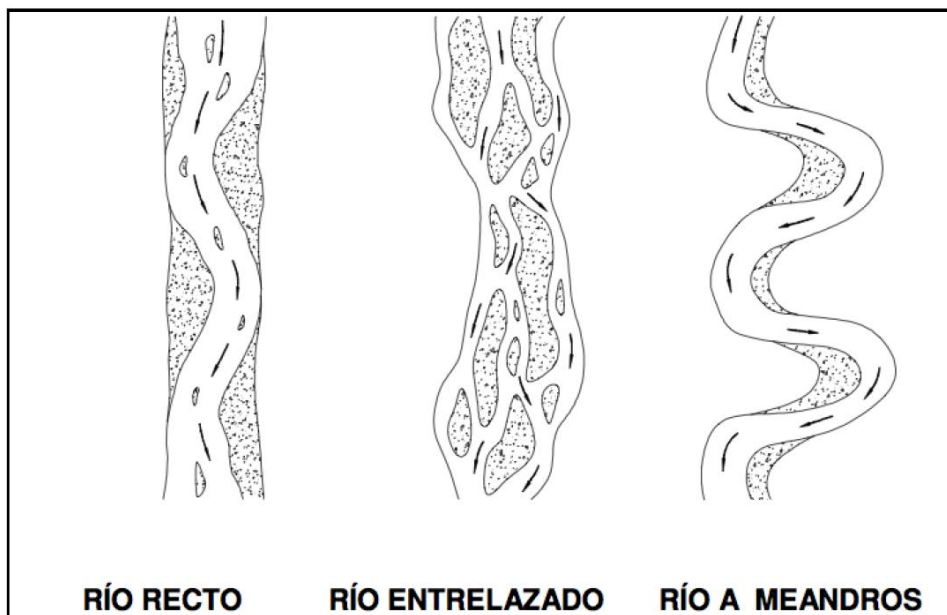
Un delta que se desarrolla cerca de la desembocadura de un río consiste en materiales finos y arena. La morfología de un delta de deriva en la interacción de procesos marinos. Una llanura de inundación que consiste en los diques naturales y los pantanos de espalda ocupan el área de transición entre un abanico aluvial y un delta. Un dique natural este compuesto de arena y limo. Los depósitos arcillosos se distribuyen en los pantanos traseros son más bajos y más húmedos que los diques naturales (Matsuda, 2004).

Los canales en un abanico aluvial están interconectados y muestran un patrón trenzado. Cuando grandes inundaciones fluyen de las montañas, los canales de un abanico aluvial a menudo cambian su curso y el canal recién creado se mantiene hasta la próxima inundación. El primer canal es abandonado y se suministra agua solo por las aguas subterráneas. Los tramos inferiores del río abandonado sigue siendo una característica en las planicies de inundación y deltas (Matsuda, 2004).

### 2.2.4 Clasificación

El comportamiento de un río está en función de su topografía y geología. Los ríos según su geometría presentan tres formas: rectos, entrelazados y medreantes. En la Figura 2-2, se puede observar la forma de estos ríos.

**Figura 2-2. Clasificación de ríos según su forma (Sánchez & Maza, 1985).**



- **Ríos rectos:** Normalmente esto ocurre en pequeños tramos y son transitorios, ya que con cualquier irregularidad en el cauce o en su alineamiento, o con la formación de bancos, se originan disturbios locales que producen flujos transversales que inician la formación de curvas y meandros. Los tramos rectos o casi rectos se presentan también cuando el río escurre a lo largo de una falla geológica. Un río recto podría definirse como aquel cuya sinuosidad es tan pequeña que puede despreciarse (Sánchez & Maza, 1985).
- **Ríos entrelazados:** Son sistemas multi-canalizados. A este tipo pertenecen aquellos que no presentan un solo cauce, si no por lo contrario se dividen en varios cauces que se entrelazan y se vuelven a separar. Con caudales bajos existen dos o más cauces entrelazados y se forman cauces secundarios. Tienen gran capacidad de transporte y sedimentación. Tienen menor energía que las corrientes rectilíneas, por lo que, al encontrarse con obstáculos tienden a modificar su trayectoria adecuándose al relieve y a los sedimentos en el fondo del cauce, presentan grandes islas y extensas planicies de inundación (Sánchez & Maza, 1985).
- **Ríos meándricos:** Los cauces presentan curvas alternadas unidas por tramos rectos y cortos. Normalmente la pendiente es baja. Son de alta sinuosidad y de un solo canal. Ya que los sedimentos en estos ríos se acumulan debido a la acción del canal principal y de la inundación periódica de las planicies laterales, están asociados a elementos morfológicos como: el canal principal, bordes naturales, planicies de inundación, lagos laterales y áreas de desborde (Sánchez & Maza, 1985).

### 3 CAPITULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Descripción del proyecto

##### 3.1.1 Área de estudio

El cantón Durán está situado al margen oriental del río Guayas, su jurisdicción política administrativa comprende la zona urbana y rural con una extensión de 58.65 km<sup>2</sup> y 253 km<sup>2</sup> respectivamente. Sus límites son: Norte: Río Babahoyo. Sur: El Cantón Naranjal. Este: El Cantón Yaguachi. Oeste: El Río Babahoyo. La evaluación del drenaje fluvial se llevará a cabo dentro de un área de estudio de 142 km<sup>2</sup> con diversos niveles de intervención a lo largo de aproximadamente 115 km de canales naturales y artificiales. 4 de los 8 esteros que atraviesan el cantón se encuentran en el área urbana, por lo tanto, es propenso a inundaciones en épocas de invierno. En la Figura 3-1 se muestra el mapa de ubicación del cantón Durán.

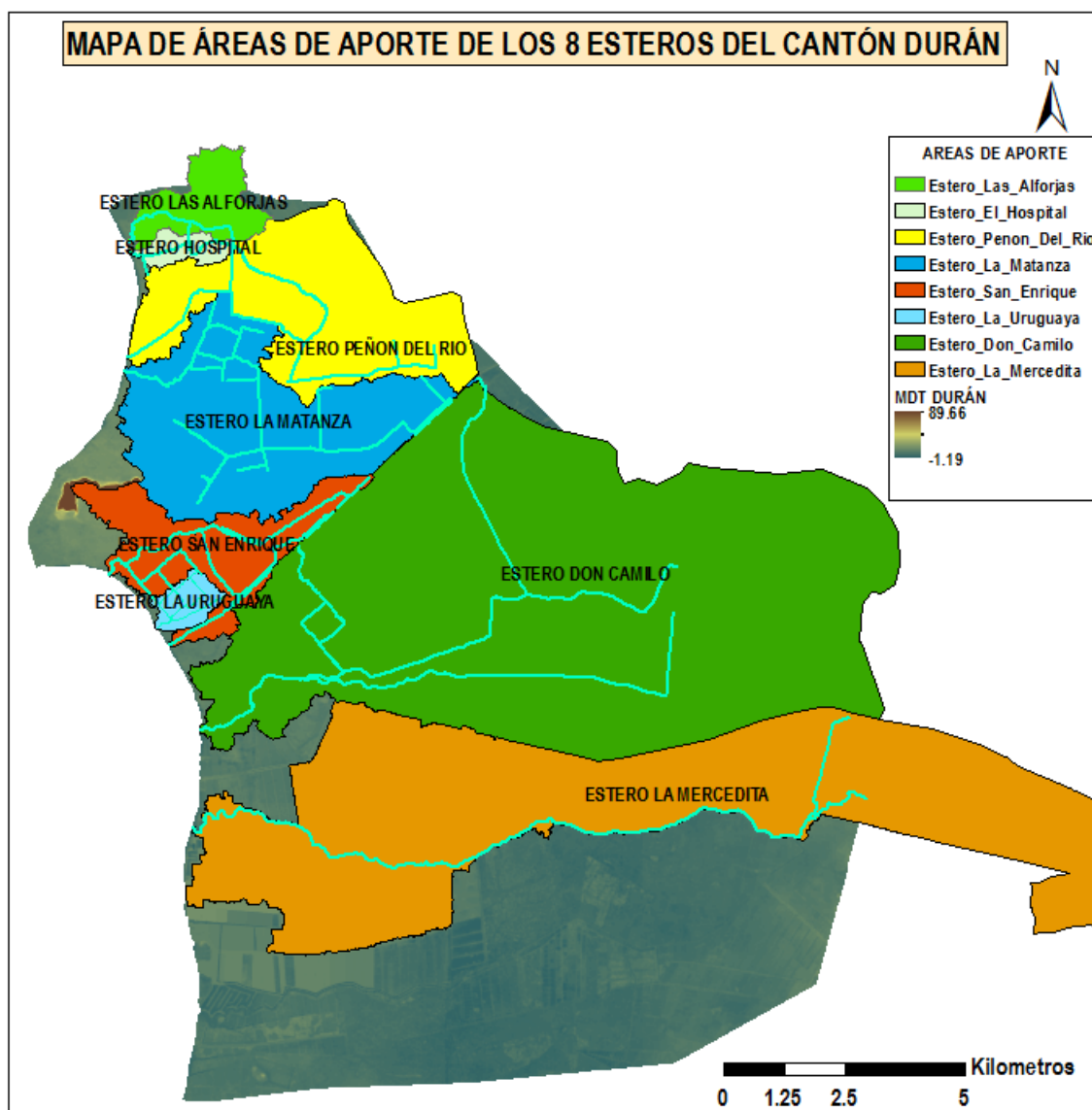
**Figura 3-1. Mapa de ubicación de la zona de estudio (PROMAS, 2016)**



### 3.1.2 Áreas de drenaje

De la zona de estudio se cuenta con un mapa de las áreas de drenaje de los 8 esteros del cantón Durán. En base a la cartografía disponible se han clasificado los esteros y canales artificiales según su área de aporte. Los canales artificiales se los ha sub-clasificado en canales principales y tributarios, siendo los canales principales los que tienen mayor área de aporte. Mientras que los canales principales y tributarios presentan un área de drenaje más pequeña, por lo tanto, tienen una menor capacidad de transporte el flujo. En la Figura 3-2, se muestra un mapa de las áreas de aporte de los 8 esteros a estudiar.

**Figura 3-2. Mapa de áreas de aporte de los 8 esteros del cantón Durán.**



En la Tabla 3-1, se presenta el área y sub-áreas de drenaje de los 8 esteros, a partir del estudio hidrológico realizado por el PROMAS (2016).



**Tabla 3-1. Áreas de aporte de los esteros, Las Alforjas, Hospital, Peñón del Río, La Matanza, San Enrique, La Uruguay, Don Camilo y La Mercedita.**

Nombre	Código	Área (km <sup>2</sup> )	Área (ha)	Área (km <sup>2</sup> )	Área (ha)
ESTERO LAS ALFORJAS	LA_ES_TR1	2.27	227.40	3.41	340.83
	LA_ES_TR2	1.06	105.53		
	LA_CH1	0.08	7.90		
ESTERO HOSPITAL	HO_ES_TR1	0.47	46.91	1.07	106.73
	HO_ES_TR2	0.57	56.57		
	HO_CH1	0.03	3.25		
ESTERO PEÑÓN DEL RÍO	PR_ES_TR3	2.03	202.63	15.22	1522.06
	PR_CH1	0.71	70.70		
	PR_ES_TR2	7.08	707.62		
	PR_ES_TR1	5.41	541.11		
ESTERO LA MATANZA	LM_ES_TR2	3.05	304.97	17.66	1766.19
	LM_CH4	2.95	295.31		
	LM_CH3	1.38	138.37		
	LM_ES_TR3	1.31	130.99		
	LM_ES_TR1	3.58	358.47		
	LM_CH9	0.47	46.68		
	LM_CH2	1.60	159.94		
	LM_CH1	0.82	81.85		
	LM_CH7	0.19	18.88		
	LM_CH8	0.32	32.17		
	LM_CH6	1.47	146.65		
	LM_CH5	0.52	51.91		
ESTERO SAN ENRIQUE	SE1_ES_TR3	2.28	228.13	7.85	784.84
	SE2_ES_TR2	0.93	92.92		
	SE1_ES_TR1	1.16	115.66		
	SE1_CH1	1.32	132.36		
	SE2_ES_TR1	0.60	59.66		
	SE1_ES_TR2	0.67	66.51		
	SE1_CH2	0.90	89.61		
ESTERO LA URUGUAYA	LU_ES_TR1	0.71	70.72	1.19	118.52
	LU_CH1	0.48	47.81		
ESTERO DON CAMILO	DC2_ES_TR1	24.45	2444.93	73.27	7327.04
	DC_ES_TRF	3.30	330.02		
	DC1_CH1	6.01	600.68		
	DC1_ES_TR1	29.74	2974.05		
	DC1_DRU_TR1	9.77	977.36		
ESTERO LA MERCEDITA	LME_ES_TRP	58.73	5873.23	63.26	6325.54
	LME_CHA1	4.52	452.31		

### 3.1.3 Morfología de los canales naturales y artificiales a ser analizados

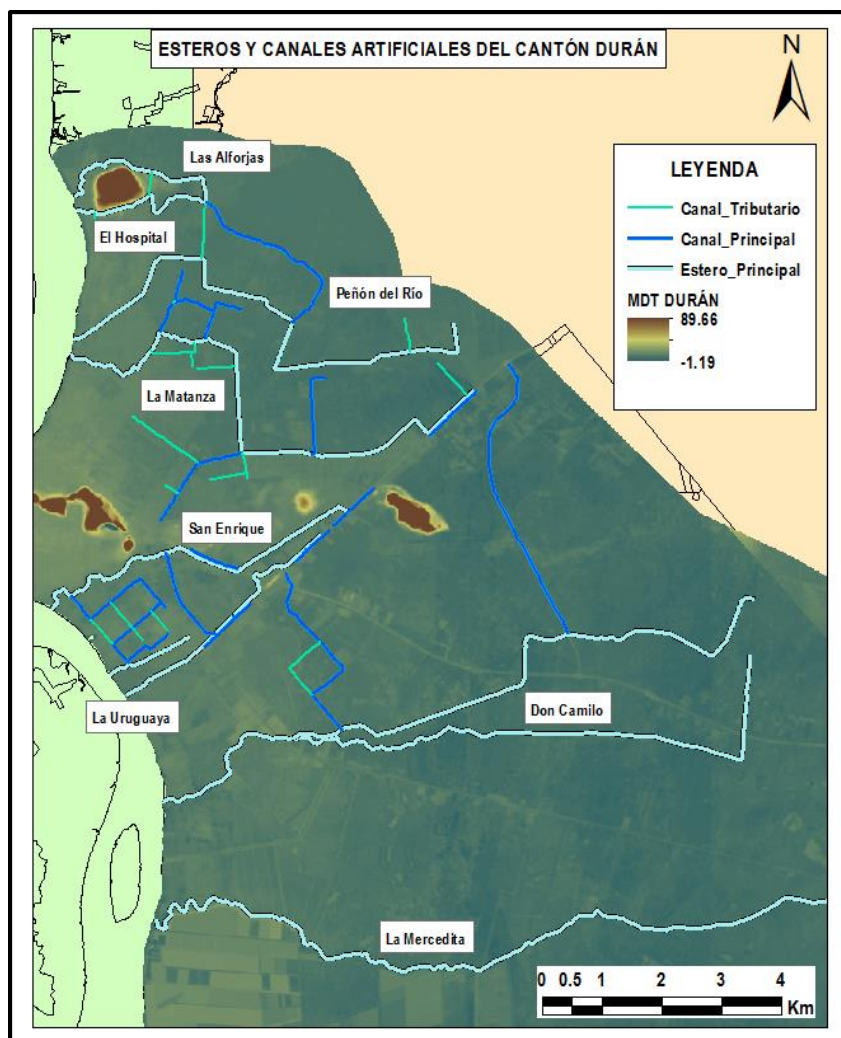
Según la información topográfica disponible, el sistema hídrico del cantón Durán se caracteriza por ser una cuenca baja, cuyo flujo desemboca en el río Babahoyo y en el río Guayas. De acuerdo con la caracterización hidrológica y morfológica, dentro de los 115 km de esteros y canales, se identificaron 8 esteros principales los cuales tiene influencia en el cantón Durán. Desde aguas arriba hacia aguas abajo a lo largo del río Babahoyo y el río Guayas, los esteros son los siguientes:

- Estero La Matanza, ubicado en el sector norte del cantón, desemboca en el río Babahoyo.
- Estero Peñón del río, desemboca en el río Babahoyo.

- Estero Hospital y Alforjas, ubicados en el sector Norte del cantón en la Cdla. Peñón del Río, desembocan al río Babahoyo.
- Estero San Enrique, ubicado en el sector sur del cantón conocido como Ferias S.A. y ciudadela los Helechos, desemboca al río Guayas.
- Estero Don Camilo, ubicado en el sector Sur del cantón, en la zona Industrial, desemboca al río Guayas.
- Estero La Uruguay, ubicado en el sector sur del cantón, en el sector industrial, desemboca en el río Guayas.
- Estero Merceditas, desemboca al río Guayas.

En la Figura 3-3, se muestra el trazado de los esteros naturales y canales artificiales del sistema de drenaje del cantón Durán.

**Figura 3-3. Mapa de esteros principales y canales tributarios. Longitud total de 115 km aproximadamente.**



En la Tabla 3-2, se muestra las longitudes totales de los esteros principales y artificiales de los 8 esteros que se estudian. La longitud total de esteros a simular es de 115 km aproximadamente. El estero Don Camilo es el de mayor longitud, tiene 32.16 km, mientras tanto, el estero Las Alforjas es el de menor longitud con 3.46 km.



**Tabla 3-2. Longitud total de esteros principales y canales artificiales.**

Nombre	Longitud (m)			
	Estero Principal	Canal Principal	Canal Tributario	Total
Las Alforjas	3204	-	259	3463
Hospital	6077	-	599	6676
Peñón del Río	9403	-	1514	10917
La Matanza	9689	6941	6116	22746
San Enrique	10725	2636	5969	19330
La Uruguay	1533	2539	905	4977
Don Camilo	22169	8595	1400	32164
La Mercedita	17176	-	-	17176

### 3.1.4 Topografía

Del área de estudio se cuenta con un Modelo Digital de Terreno (MDT) a escala 1:5000 obtenido del SIG Tierras. El software AutoCAD Civil 3D garantiza una adecuada precisión y confiabilidad para obtener una correcta ubicación de los puntos de detalle y generación de curvas de nivel. El procesamiento de la información consistió en restituir los levantamientos en función de la libreta de campo, todo el trabajo realizado con la estación total esta enlazado al hito ubicado en el tanque de agua potable de Durán el punto conocido como “GPS 12” levantado dentro de la red geodésica para el proyecto “CHOBO” (PROMAS, 2016).

El PROMAS (2016) realizó una verificación de las triangulaciones generadas y que estas correspondan a cambios de pendiente bruscos, hidrografía existente y estructuras topográficas encontradas en campo con lo finalidad de no alterar el curvado generado. Las curvas de nivel generadas fueron suavizadas con la herramienta (smooth) y contienen fundamentalmente el atributo “Z” (Cota). Además, se realizaron levantamientos de secciones transversales (batimetrías) en el centro y bordes del cauce para la reconstrucción de los canales, con el fin de servir como apoyo para la modelación hidráulica y el diseño arquitectónico de 1 km de estero del proyecto Durán (PROMAS, 2016).

### 3.1.5 Hidrología

La zona de estudio tiene un clima tropical mega térmico que va desde húmedo hasta seco y semiárido. En general, predomina el tropical húmedo, con dos estaciones bien marcadas: la seca entre mayo y diciembre; y la lluviosa de diciembre – enero hasta abril, aproximadamente (Secretaría General de Planificación y Desarrollo). Para realizar la evaluación de la capacidad del cauce en los 8 esteros, se evaluaron los caudales de invierno. En la Tabla 3-3, se muestra los caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años, obtenidos del análisis hidrológico entregado por el PROMAS (2016).

**Tabla 3-3. Caudales de crecida por sub áreas y áreas de aporte de los esteros para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años (PROMAS, 2016).**

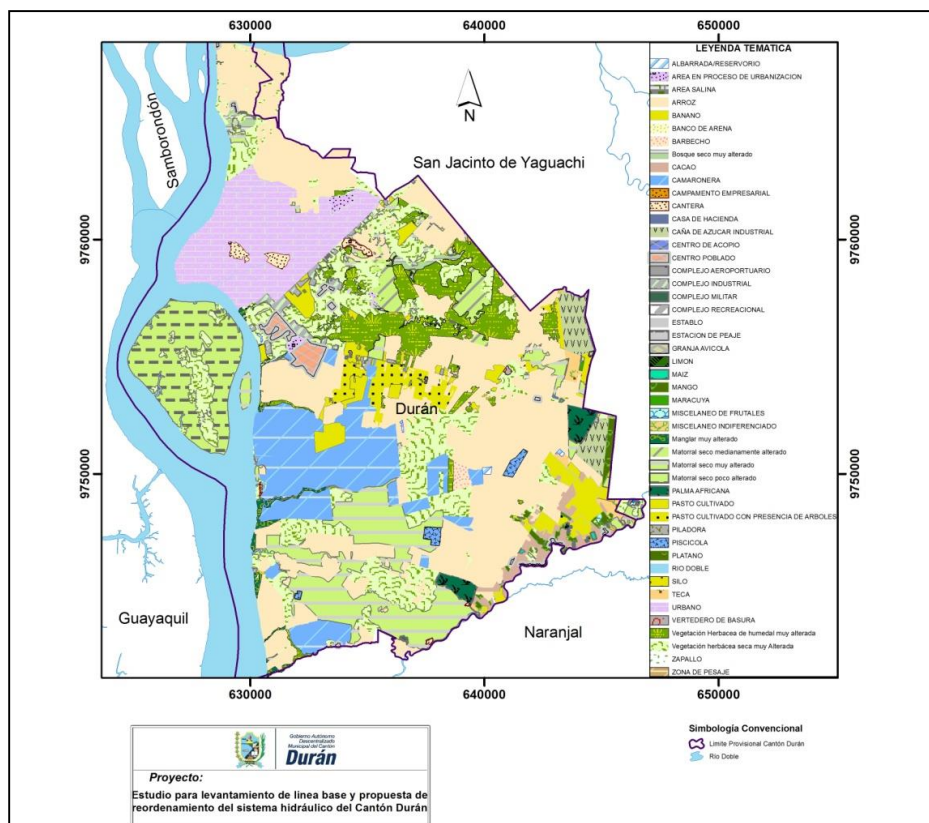
Esteros	Punto (Código)	Por sub áreas de aporte (m³/s)			Por áreas de aporte (m³/s)			Qmed Invierno (m³/s)
		Q 5	Q 25	Q 100	Q 5	Q 25	Q 100	
Don Camilo	DS2_ES_TR1	17.1	42.9	81	95.7	244.8	457.6	67.84
	DS_ES_TRF	7.1	18.1	33.5				
	DC1_ES_TR1	37.7	97	182.7				
	DC1_CH1	10.2	25.9	48.2				

	DC1_DRU_TR1	23.6	60.9	112.2				
	HO_ES_TR1	1.6	3.6	6.2				
El Hospital	HO_ES_TR2	3.2	6.4	10.5	5	10.4	17.4	1.59
	HO_CH1	0.2	0.4	0.7				
	LM_ES_TR2	17.3	34.4	55.5				
	LM_CH4	21.2	40.5	64.4				
	LM_CH3	11.3	21.3	35.1				
	LM_ES_TR3	9.1	17.6	28				
	LM_ES_TR1	13.7	27.8	45.4				
La Matanza	LM_CH9	3.9	7.3	12	112.5	217.1	351.3	16.25
	LM_CH2	12.6	23.1	37.8				
	LM_CH1	6.6	12.2	20				
	LM_CH7	1.8	3.5	5.7				
	LM_CH8	2.8	5.7	9.3				
	LM_CH6	8.3	16.4	26.5				
	LM_CH5	3.9	7.3	11.6				
La Merceditas	LME_ES_TRP	13.1	16.9	31.2	20.1	31	54.8	58.57
	LME_CHA1	7	14.1	23.6				
La Uruguay	LU_ES_TR1	4.4	8.6	14.2	7.7	14.7	24.1	0.9
	LU_CH1	3.3	6.1	9.9				
	LA_ES_TR1	2.9	7.3	13.9				
Las Alforjas	LA_ES_TR2	2	4.5	8.1	5.3	12.6	23.3	3.16
	LA_CH1	0.4	0.8	1.3				
	PR_ES_TR3	2.1	4.6	8.2				
Peñón del Río	PR_CH1	3.1	6.9	11.8	12.5	26.3	46.2	14.09
	PR_ES_TR2	3.6	7.1	12.7				
	PR_ES_TR1	3.7	7.7	13.5				
	SE1_ES_TR3	17.2	32.2	51.1				
	SE2_ES_TR2	7.1	13.2	20.9				
	SE1_ES_TR1	9.3	16.9	27.6				
San Enrique	SE1_CH1	8.4	16.4	26.1	57.7	109.5	175.7	6.64
	SE2_ES_TR1	4.9	9.2	15.1				
	SE1_ES_TR2	5.7	11.4	18.5				
	SE1_CH2	5.1	10.2	16.4				

### 3.1.6 Ocupación del suelo

Por medio de un mapa generado de uso de suelo del cantón Duran y áreas de influencia, se obtuvo una información general de la superficie de drenaje. De acuerdo con la Figura 3-4 se rescatan las siguientes coberturas predominantes: camaroneras, cultivos de arroz, banana, matorral y vegetación herbácea alterada, esto sumado a la zona urbana del Cantón Duran forman los usos de suelo predominantes en el área de proyecto.

**Figura 3-4. Mapa de uso de suelo del cantón Durán (PROMAS, 2016).**



### 3.2 Implementación del modelo 1-D

La modelación unidimensional se ha manejado en los últimos años, con el uso del programa HEC-RAS del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos por ser de libre acceso, empleado principalmente para la determinación de mapas de inundación (Ayala, 2014). HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center-River Analysis System), permite trabajar con flujos mixtos, subcrítico y supercrítico. Además, presenta herramientas para la implementación de estructuras fluviales como diques, puentes, alcantarillas y compuertas (S. Ochoa et al., 2016).

El modelo HEC-RAS permite realizar cálculos en régimen permanente y variable. Resuelve las ecuaciones de Saint Venant 1-D, mediante un esquema implícito de diferencias finitas calculadas en cada paso de tiempo. En una modelación unidimensional lo habitual es considerar al cauce como una línea (eje o thalweg), con una serie de puntos de cálculo que son las secciones transversales, de manera que la geometría del cauce es una propiedad de cada punto de cálculo o sección.

Los modelos unidimensionales son ampliamente usados para generar mapas de inundación ya que produce buenos resultados sin altos requerimientos computacionales (Castro & Willems, 2011). Para este trabajo se utilizará la modelación unidimensional en 8 esteros para la generación de mapas de inundación en el cantón Durán.

### 3.2.1 Ecuaciones hidrodinámicas

HEC-RAS resuelve las ecuaciones de Saint Venant en 1-D, que consisten en un sistema de ecuaciones en derivadas parciales formado por la ecuación de la continuidad y la del momentum (conservación de la cantidad de movimiento) cuando se considera una aproximación completamente dinámica, es decir, que considera todas las fuerzas que interactúan en el tránsito de la creciente (Cea & Bladé, 2007; Villazón, Timbe, & Willems, 2013). Las ecuaciones son las siguientes:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (3-1)$$

Y:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\alpha Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + n^2 \frac{gQ|Q|}{AR^{\frac{4}{3}}} = 0 \quad (3-2)$$

Donde  $Q$  es el caudal ( $m^3/s$ ),  $\alpha$  es el coeficiente de distribución vertical de la velocidad,  $A$  es el área de la sección transversal ( $m^2$ ),  $g$  es la aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ),  $x$  es la distancia aguas abajo en la dirección del flujo ( $m$ ),  $h$  es la profundidad del flujo por encima del nivel de referencia ( $m$ ),  $t$  es el tiempo en ( $s$ ),  $n$  es el coeficiente de Manning ( $s/m^{1/3}$ ),  $q$  es la entrada de flujo lateral ( $m^2/s$ ), y  $R$  es el radio hidráulico ( $m$ ).

### 3.2.2 Esquema numérico

El procedimiento por el que HEC-RAS resuelve las ecuaciones de flujo unidimensional no estacionario es el esquema implícito de diferencias finitas de cuatro puntos o esquema de Preissmann. En este esquema las derivadas respecto al espacio y las variables son evaluadas en el interior de un punto  $(n + \theta) \Delta t$ . Así las variables en  $(n + \theta) \Delta t$  entran en todos los términos en las ecuaciones. Para cada tramo de río (en medio de dos secciones transversales) resulta un sistema de ecuaciones simultáneas. La solución simultánea es un aspecto importante en este esquema, esto permite que la información del tramo entero tenga influencia en la solución de cualquier otro punto del río (US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center, 2010).

Por lo tanto, aplicando el esquema de Preissmann a las ecuaciones de Saint Venant para un tramo de cauce dividido en  $n$  secciones, en cada una de las cuales hay dos incógnitas (caudal  $Q$  y calado  $h$ ), se obtienen  $2(n-1)$  ecuaciones. Se requieren por lo tanto otras dos ecuaciones, una en el extremo aguas arriba del tramo y otra en el extremo aguas abajo, para poder resolver el sistema. Estas dos ecuaciones pueden ser o bien las condiciones de contorno (caudal o hidrograma de entrada, nivel dado de la superficie del agua, entre otras), o en caso de nodos donde confluyen tres canales, la ecuación de conservación de la energía (Cuervo, 2012).

### 3.2.3 Construcción de la geometría de los esteros naturales y canales artificiales

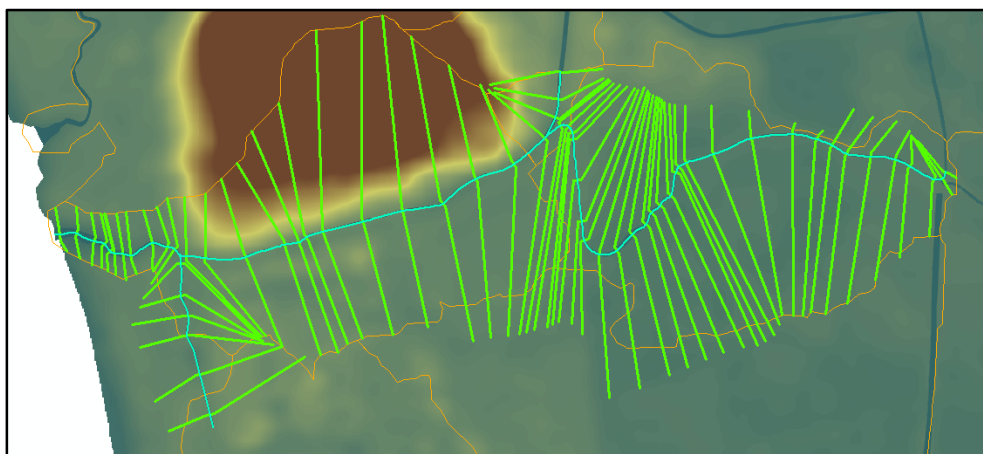
A partir de la información disponible, se construyó un sistema de eje de ríos (esteros y canales) y secciones transversales, integrando la topografía de campo con la cartografía existente de las zonas de inundación. La geometría de los esteros y canales se la obtiene con la extensión HEC-GeoRAS en ArcGIS, mediante esta herramienta se realizó el trazado en planta del cauce del río (Thalweg), bancos de inundación izquierdo y derecho y las secciones transversales cada 100 metros. En tramos con curvas se construyeron secciones transversales al inicio, al medio y al final de las curvas y en puntos de inflexión de manera que se cubran las posibles zonas de

inundación. Las secciones transversales se las generó automáticamente con 50 metros de ancho, para la implementación del modelo unidimensional se extendió las secciones transversales a lo largo de las posibles zonas de inundación para lo cual se tomó las siguientes consideraciones:

- Las secciones deben ser perpendiculares al cauce los canales.
- Las secciones no deben cortarse unas con otras ya que esto produce un error en la simulación.

En la Figura 3-5, se muestra las secciones transversales del estero El Hospital para el modelo unidimensional. Las secciones transversales de los 7 esteros restantes se muestran en el Anexo A.

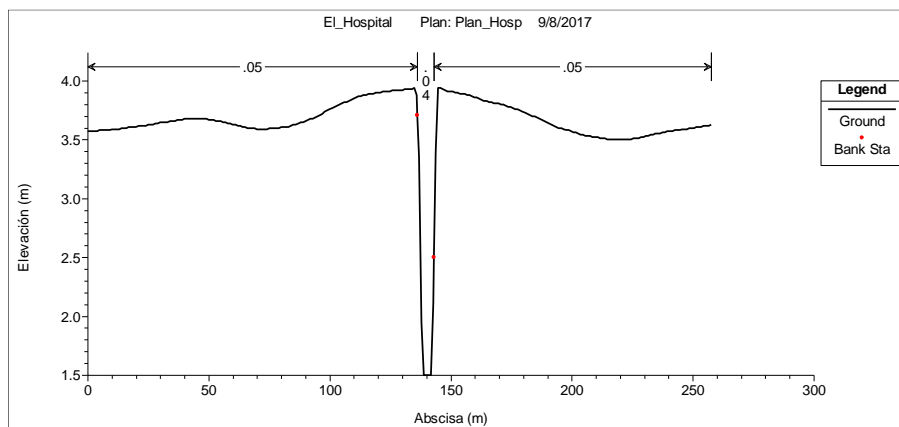
**Figura 3-5. Secciones transversales del estero El Hospital para el modelo unidimensional.**



Una vez obtenida las secciones transversales se importó la geometría de cada uno de los esteros a un formato compatible con la herramienta HEC-RAS.

De la geometría obtenida a partir del Modelo Digital de Terreno (MDT) se realizó un filtrado de puntos ya que el modelo HEC-RAS permite únicamente 500 puntos por cada sección transversal, por lo que es necesario reducir el número de puntos ya que el programa no permitirá compilar. En cada una de las secciones transversales se asignó la distancia entre secciones trasversales desde aguas arriba hacia aguas abajo del cauce principal y de las planicies de inundación. Además, se realizó una corrección en la delimitación de los bancos de inundación.

**Figura 3-6. Sección transversal del estero El Hospital en la abscisa 2+665,81 m.**



### 3.2.4 Asignación de rugosidades al terreno

HEC-RAS permite asignar un coeficiente de rugosidad variable en el cauce principal y en los bancos de inundación izquierdo y derecho. Debido a que existe una gran cantidad de secciones transversales en cada uno de los esteros se consideró un solo coeficiente de rugosidad para el cauce principal, mientras que para los bancos de inundación se tomó un valor en función del tipo y el tamaño de la cobertura en base al mapa de uso de suelo. En base a los criterios de Chow (1994); Arcement and Schneider (1989) del USGS, se han asignado los siguientes coeficientes de rugosidad de Manning, tal como se muestra en la Tabla 3-4.

**Tabla 3-4 Coeficientes de rugosidad de Manning en función de la cobertura de uso de suelo.**

Cobertura	Coef. Rugosidad de Manning
Arroz	0.045
Bosque seco muy alterado	0.10
Matorral seco muy alterado	0.11
Vegetación herbácea muy seca	0.055
Urbano	0.12
Rio, canal	0.04

### 3.2.5 Condiciones de borde del modelo

Los parámetros por definir en la simulación en régimen permanente en el modelo HEC-RAS son tanto geométricos como hidráulicos. Las condiciones de borde definen el comportamiento del modelo en sus límites, tanto aguas arriba como aguas abajo. En el régimen permanente se definen 4 tipos de condiciones de contorno: nivel de agua, calado crítico, curva de descarga y calado normal.

Para este trabajo se utilizó la opción de calado normal, ya que permite el ingreso de pendientes del fondo del estero tanto aguas arriba como aguas abajo. Con una pendiente promedio de 3/1000 m/m, se ha caracterizado el flujo en el régimen subcrítico aguas arriba; por lo tanto, para la condición de borde aguas arriba del modelo se ingresó la pendiente del estero. En la condición de borde de salida, se ingresó en régimen subcrítico. Debido a que se está analizando inundaciones fluviales, se ingresó caudales máximos, ya que se modela para las condiciones más desfavorables. Este procedimiento se realizó para todos los esteros principales y canales artificiales del cantón Durán.

En las intersecciones del estero principal y los canales artificiales, se asignó como condición la unión de los ejes del cauce (Juntion). En la intersección de canales, HEC-RAS permite ingresar la distancia entre las secciones extremas de cada uno de los tramos que la conforman. Para realizar la modelación de la unión de canales, se utilizó el criterio de la ecuación de la energía ya que no considera el efecto del ángulo que forman los canales o ríos. En la mayoría de los casos la cantidad de pérdida de energía debido al ángulo que forman los cauces en una intersección es despreciable.

## 3.3 Implementación del modelo 2-D

Los modelos matemáticos bidimensionales han sido ampliamente utilizados en la modelación del flujo para la generación de mapas de inundación. Esto se debe a que los modelos bidimensionales representan mejor las zonas de inundación en comparación con los modelos unidimensionales, ya que toman en consideración la variación de la

velocidad y la profundidad del flujo  $h$  en las dos direcciones  $x$  y  $y$ . Los modelos bidimensionales son utilizados para representar el flujo en cauces naturales, canales y obras hidráulicas; a un coste computacional mayor que un modelo unidimensional, y menor que los modelos tridimensionales (Fe Marqués, 2005).

IBER, es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen permanente y no-permanente, además se aplica también en procesos medioambientales en hidráulica fluvial. El modelo consta de 3 módulos de cálculo principales: hidrodinámico, turbulencia y de transporte de sedimentos. Estos trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos. El modelo resuelve las ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones promediadas en profundidad, mediante un esquema explícito en volúmenes finitos con precisión de alta resolución. El mismo es utilizado para predecir la tendencia del flujo determinando el campo de velocidades y la distribución de caudales (FLUMEN, 2003).

### 3.3.1 Ecuaciones básicas

La modelación de hidrodinámica consiste en resolver las ecuaciones de Saint Venant para calcular niveles de agua en las secciones transversales especificadas a lo largo del trayecto para los caudales en estudio. A continuación, se describe las formulaciones utilizadas para construir el modelo de los canales naturales y artificiales.

#### 3.3.1.1 Ecuaciones hidrodinámicas

Varios estudios en ingeniería hidráulica conllevan al análisis de flujos en superficie libre, de los cuales un gran número se los puede considerar como poco profundos, refiriéndonos a estos como aquellos que presentan una relación profundidad/ancho del cauce, pequeña (Cea, 2005). Para la modelación hidrodinámica de flujos poco profundos en ríos es necesario resolver las ecuaciones de flujo variable en lámina libre o ecuaciones bidimensionales de Saint-Venant. Estas ecuaciones se obtienen promediando en la vertical las ecuaciones turbulentas de Reynolds (Bladé *et al.*, 2014).

Las ecuaciones de Saint Venant se obtienen a partir de las leyes físicas de la conservación de la masa y la cantidad de movimiento, junto con la primera y la segunda leyes de la termodinámica. De ellas, para un fluido newtoniano e isótropo se obtienen las ecuaciones de Navier Stokes que particularizadas para describir las variables promediadas en un pequeño incremento de tiempo se concretan en las ecuaciones de Reynolds (Bladé Castellet & Gómez Valentín, 2006).

En el módulo hidrodinámico se resuelven las ecuaciones de conservación de la masa y de momento en las dos direcciones horizontales:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hU_x)}{\partial x} + \frac{\partial(hU_y)}{\partial y} = M_s \quad (3-3)$$

$$\frac{\partial(hU_x)}{\partial t} + \frac{\partial(hU_x^2)}{\partial x} + \frac{\partial(hU_xU_y)}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{g}{\rho} \frac{h^2}{2} \frac{\partial \rho}{\partial x} + 2\Omega \sin \lambda U_y + \frac{\partial h\tau_{xx}^e}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{xy}^e}{\partial y} + M_x \quad (3-4)$$

$$\frac{\partial(hU_y)}{\partial t} + \frac{\partial(hU_xU_y)}{\partial x} + \frac{\partial(hU_y^2)}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{g}{\rho} \frac{h^2}{2} \frac{\partial \rho}{\partial y} - 2\Omega \sin \lambda U_x + \frac{\partial h\tau_{xy}^e}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{yy}^e}{\partial y} + M_y \quad (3-5)$$



Donde  $U_x$  y  $U_y$  son las velocidades promediadas en profundidad,  $\tau_s$  es la fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento,  $\tau_b$  es la fricción debido al rozamiento del fondo,  $\rho$  es la densidad del agua,  $\Omega$  es la velocidad angular de la tierra,  $\lambda$  es la latitud del punto considerado,  $h$  representa la altura de agua y  $M_s, M_x, M_y$  son los términos fuente/sumidero de masa y momento, a través de los cuales se realiza la modelización de precipitación, infiltración y sumideros,  $\tau_{xx}^e, \tau_{xy}^e, \tau_{yy}^e$  son las tensiones efectivas horizontales (FLUMEN, 2003).

### 3.3.1.2 Fricción de fondo

La fricción de fondo tiene dos efectos en las ecuaciones de flujo, produce una fuerza de fricción  $\tau_b$  que se opone a la velocidad media, y genera turbulencia. Ambos efectos pueden ser descritos por la velocidad de fricción  $u_f$ , que simplemente es expresar la tensión tangencial de fondo con unidades de velocidad (FLUMEN, 2003).

$$u_f = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \quad (3-6)$$

En los modelos de aguas someras, no es posible evaluar la velocidad de fricción de fondo por medio de funciones de pared estándar, debido a que las ecuaciones no se resuelven en la vertical. Por ello es necesario una expresión que relacione la velocidad de fricción con la velocidad media promediada en profundidad mediante un coeficiente de fricción (FLUMEN, 2003). La tensión tangencial de fondo se puede expresar como:

$$\tau_b = \rho u_f^2 = \rho C_f |U|^2 \quad (3-7)$$

Siendo  $C_f$  el coeficiente de fricción de fondo. En la literatura técnica se puede encontrar distintas expresiones para aproximar este coeficiente, sin embargo, la mayor parte de ellas asumen flujo uniforme en canal con un perfil logarítmico de velocidad en profundidad (FLUMEN, 2003).

La fricción de fondo se evalúa mediante la fórmula de Manning, la cual utiliza el coeficiente de Manning  $n$  como un parámetro.

$$C_f = g \frac{n^2}{h^3} \quad (3-8)$$

### 3.3.2 Esquema numérico

Las ecuaciones hidrodinámicas se resuelven en forma integral por el método de volúmenes finitos. Para resolver una ecuación diferencial por el método de volúmenes finitos es necesario realizar previamente una discretización espacial del dominio a estudiar. Para ello, se divide el dominio de estudio en celdas de tamaño relativamente pequeño (malla de cálculo). IBER trabaja con mallas no estructuradas formadas por elementos que pueden tener 3 o 4 lados. Se pueden combinar elementos irregulares de 3 a 4 lados dentro de una misma malla (Bladé et al., 2014).



Los valores calculados representan el valor medio de todo el elemento y es almacenado en el centro geométrico de la malla (Cea, 2005).

Los esquemas clásicos presentan desventajas en cuanto a que aparecen discontinuidades en la solución (resaltos hidráulicos, frentes de onda, etc.) y son óptimos solo para la resolución de problemas de flujo gradualmente variado. Por otro lado, la técnica de volúmenes finitos permite una gran flexibilidad geométrica (ideal para problemas de hidráulica fluvial), siendo un método especialmente adecuado para resolver las ecuaciones de conservación (de masa y de movimiento de las ecuaciones 2D). Por ello se muestra muy útil y toma ventaja respecto a los esquemas clásicos, siendo el método más extendido y frecuentemente usado en problemas de dinámica de fluidos computacional. Es por esto que se utiliza el método de volúmenes finitos para la solución del problema (Bladé Castellet & Gómez Valentín, 2006; Calzas Pérez, 2013).

Para hallar el valor de las variables hidráulicas entre centro y centro de los volúmenes; es necesario realizar una aproximación del flujo de agua o cantidad de movimiento entre los diferentes elementos que forman la malla de cálculo. Esto constituye la discretización espacial de los elementos. La discretización temporal corresponde a que instante se realiza las aproximaciones de flujo entre elementos (FLUMEN, 2003).

### 3.3.2.1 Discretización espacial

Para hallar las variables hidráulicas entre elementos es necesario una interpolación entre celdas. La interpolación más intuitiva es una interpolación lineal o esquema centrado. El principal problema con este tipo de esquemas es que son numéricamente inestables, lo que se traduce en una posible falla en el proceso de resolución de las ecuaciones. Esto ocurre ya que en un esquema centrado no considera la dirección en la cual se propaga el flujo. Estos problemas no presentan los esquemas descentrados ya que toman en cuenta la velocidad y dirección del flujo (Bladé & Gómez, 2006).

Es posible usar esquemas descentrados de distinto orden, la principal diferencia entre ellos es la forma en la que estiman el flujo entre los elementos de la malla. Un esquema de primer orden para evaluar el flujo utiliza información del nodo ubicado aguas abajo mientras que uno de segundo orden utiliza información de varios nodos ubicados aguas arriba (por lo general dos). En general un esquema de primer orden es menos preciso y se requiere que el tamaño de las celdas de la malla sea relativamente pequeño, pero en cambio es mucho más estable que un esquema de segundo orden. El modelo IBER para la interpolación del flujo convectivo incluye esquemas descentrados de primer orden (esquema de Roe) y de segundo orden (esquema de Minmod) que son esquemas de tipo Godunov (FLUMEN, 2003).

### 3.3.2.2 Discretización temporal

La discretización temporal hace referencia a que instante de tiempo se va a evaluar el flujo entre los elementos de la malla. Se puede optar por dos esquemas explícitos e implícitos (FLUMEN, 2003). Un esquema explícito se utiliza para el cálculo de las variables el valor que toman las mismas en el instante anterior, en cambio esquema implícito evalúa las variables dependientes en el instante  $t^{n+1}$  y utiliza para el cálculo el valor que toman en el instante anterior  $t^n$  y en el mismo instante  $t^{n+1}$ , es por ello que tienen un alto coste computacional. Estas dificultades no presentan los esquemas explícitos, pero en cambio es necesario que el paso del tiempo sea pequeño para que sean estables (Bladé Castellet & Gómez Valentín, 2006; Fe Marqués, 2005).

La estabilidad numérica de los esquemas explícitos está controlada por la condición CFL (llamada así por los tres matemáticos que lo propusieron, Richard Courant, Kurt Friedrichs y Hans Lewy). Esta condición limita el valor máximo del paso del tiempo de acuerdo con la expresión:

$$\Delta t_{CFL} = CFL \frac{\Delta x}{U + \sqrt{g * h}} \text{ con } CFL < 1 \quad (3-10)$$

Siendo  $\Delta x$  el tamaño de la celda,  $U$  la velocidad del agua,  $g$  la aceleración de la gravedad,  $h$  la altura del agua y  $CFL$  un parámetro que debe estar entre 0 y 1 (FLUMEN, 2003).

El parámetro CFL fija una restricción en el paso del tiempo utilizado para desarrollar la integración temporal de las ecuaciones de aguas someras. Mientras mayor sea el valor de CFL menos tiempo se demorará en realizarse el cálculo, sin embargo, es posible que se produzcan problemas de estabilidad numérica. Se recomienda el uso de un CFL igual a 0,45 cuando el esquema utilizado es de segundo orden. Si se presentaran problemas de estabilidad se recomienda disminuir el valor de CFL hasta un límite inferior de 0,3; ya que para valores inferiores a éste es probable que los problemas de estabilidad sean por una razón diferente (Flumen, 2010).

### 3.3.3 Construcción del modelo

En una primera etapa se realizó la modelación de los esteros La Uruguaya y San Enrique 1 en su estado natural, para esto a partir de la información disponible, se convirtió el MDT (Modelo Digital de Terreno) en formato ASCCI de los esteros La Uruguaya y San Enrique 1. Esta geometría se importó a IBER en forma de una red irregular de triángulos rectángulos (RTIN). IBER permite ingresar el lado máximo y mínimo para la triangulación, así como también una tolerancia, la cual indica la semejanza o error entre el MDT original y el RTIN construido en IBER.

En IBER se construyó una malla con elementos no estructurados que representa con el mejor detalle la topografía de la zona estudiada. Para la construcción de los modelos de los esteros La Uruguaya y San Enrique 1, se asignó el tamaño máximo 20 metros y un tamaño mínimo de 1 metro y una tolerancia de 0.3.

En una segunda etapa, se analizó el mapa de inundación para un periodo de retorno de 100 años de los esteros La Uruguaya y San Enrique 1, cuyas áreas de inundación eran mayores. A partir del mapa de inundación, se identificó zonas propensas a inundaciones por lo que se incorporó diques, los cuales son estructuras que permiten prevenir las inundaciones. En IBER se incorporó diques rectangulares en la malla no estructurada mediante el ingreso de coordenadas inicial, final y la cota del dique. Además, IBER permite ingresar el ancho y altura del dique, en este caso, se utilizó un ancho de 1 m para todos los diques, mientras que la altura del dique se tomó un valor en base a los calados máximos en las zonas de estudio.

### 3.3.4 Asignación de rugosidades al terreno

En IBER, la resistencia al flujo se asigna través de un coeficiente de Manning que se puede definir según los usos de suelo. La asignación de las rugosidades puede ser automática o manual. En este trabajo se realizó una asignación de rugosidades automática a partir de un mapa de uso de suelo generado en ArcGIS, el cual fue exportado en un formato ASCII compatible con el modelo IBER. Cuando se asigna los coeficientes de Manning a través de un archivo ASCII, es necesario que en el mismo directorio se encuentre un archivo con el mismo nombre en formato CSV, el cual contiene los usos de suelo utilizados y que además deben de coincidir con la base de datos

existente en IBER. En el caso de no existir el uso de suelo, el programa permite ingresar un nuevo uso de suelo en su base de datos. Para la modelación de los esteros La Uruguay y San Enrique 1, se ha registrado 5 usos de suelo (Tabla 3-4), según el mapa de uso de suelo. Existen ciertos usos de suelo que pueden ser reagrupados en entidades de similar rugosidad según Chow (1994); Arcement and Schneider (1989) de la (USGS).

### 3.3.5 Condiciones de borde del modelo

Para la solución de las ecuaciones diferenciales descritas anteriormente, se requiere ingresar las condiciones de borde aguas arriba y aguas debajo de los esteros naturales y canales artificiales del estero La Uruguay y San Enrique 1.

Para las condiciones de entrada, se asignó la entrada del flujo en el borde de la malla y se ingresó caudales constantes (flujo estacionario) para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años. Para los 2 esteros se ha caracterizado un régimen de flujo subcrítico como condición de entrada, con una pendiente promedio de  $S_o=0.003$  m/m. Para este trabajo no se ingresó hidrogramas de crecida debido a que se está modelando para las condiciones más desfavorables. Respecto a las condiciones de salida, se asignó la salida del flujo aguas abajo estableciendo un régimen supercrítico.

Para la simulación del estero La Uruguay y San Enrique 1, se consideró un dominio seco – mojado de 1 cm, el cual permite analizar como el agua se encauza sobre el lecho del río y lograr alcanzar el flujo estacionario. En la simulación de los dos esteros se utilizó un esquema numérico de segundo orden con un valor del parámetro CFL igual a 0.45 y con un numero de procesadores de 8.

### 3.3.6 Validación de los modelos 1-D y 2-D

Existen varios métodos estadísticos para la evaluación y comparación de resultados, Ochoa *et al.* (2014) indica que en el caso de la modelación unidimensional en HEC-RAS los parámetros de mayor sensibilidad a tomar en cuenta son los coeficientes de expansión y contracción para flujos estacionarios en cada sección de cálculo y la tolerancia en los niveles del flujo calculados; además indica que los parámetros de sensibilidad en el modelo bidimensional son las variables de paso temporal y el tamaño de las celdas de la malla de cálculo.

Sin embargo, Willems (2012) indica que antes de realizar una comparación entre los resultados de los modelos simulados y observados se puede usar modelos estadísticos de bondad de ajuste como error medio, error cuadrático medio y desviación estándar, con lo cual se puede medir la sensibilidad de los datos. Para este trabajo se realizó un análisis entre los modelos 1-D y 2-D mediante una comparación de áreas de inundación y cotas máximas.

## 4 CAPITULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 RESULTADOS

#### 4.1.1 Modelo HEC-RAS.

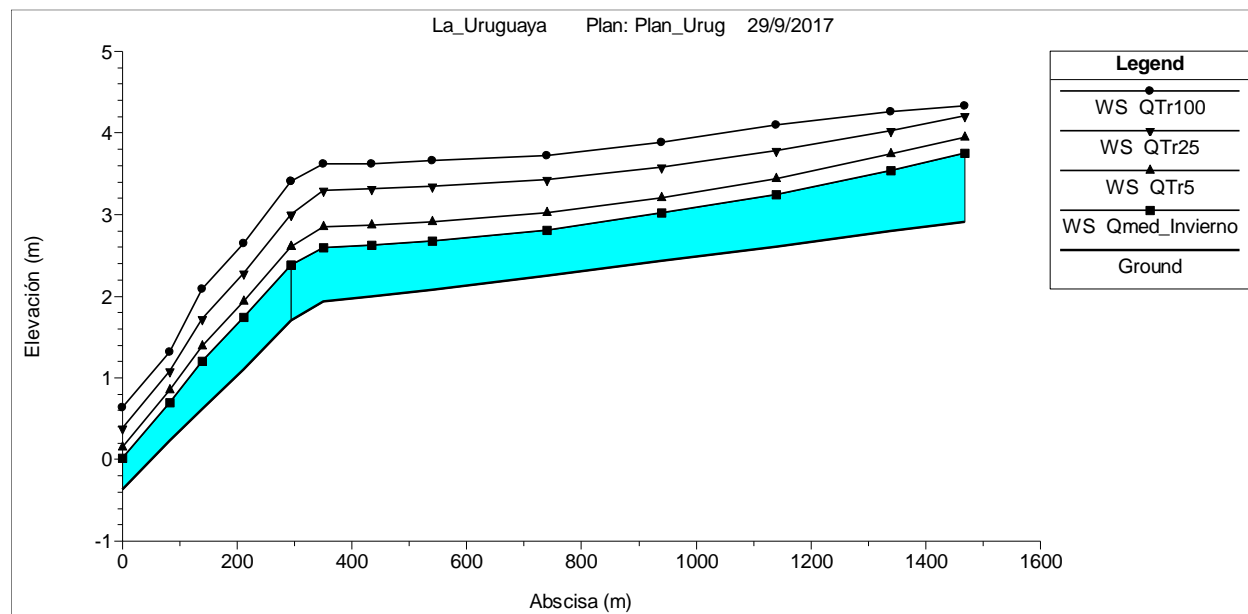
Mediante el modelo numérico HEC-RAS se realizaron simulaciones para los diferentes caudales de crecida para periodos de retorno de 5, 25 y 100 años. En esta sección se presentan los resultados de perfiles longitudinales del estero principal, calados, velocidades de flujo, secciones transversales y mapas de inundación para los 8 esteros del cantón Durán.

##### 4.1.1.1 Estero La Uruguaya

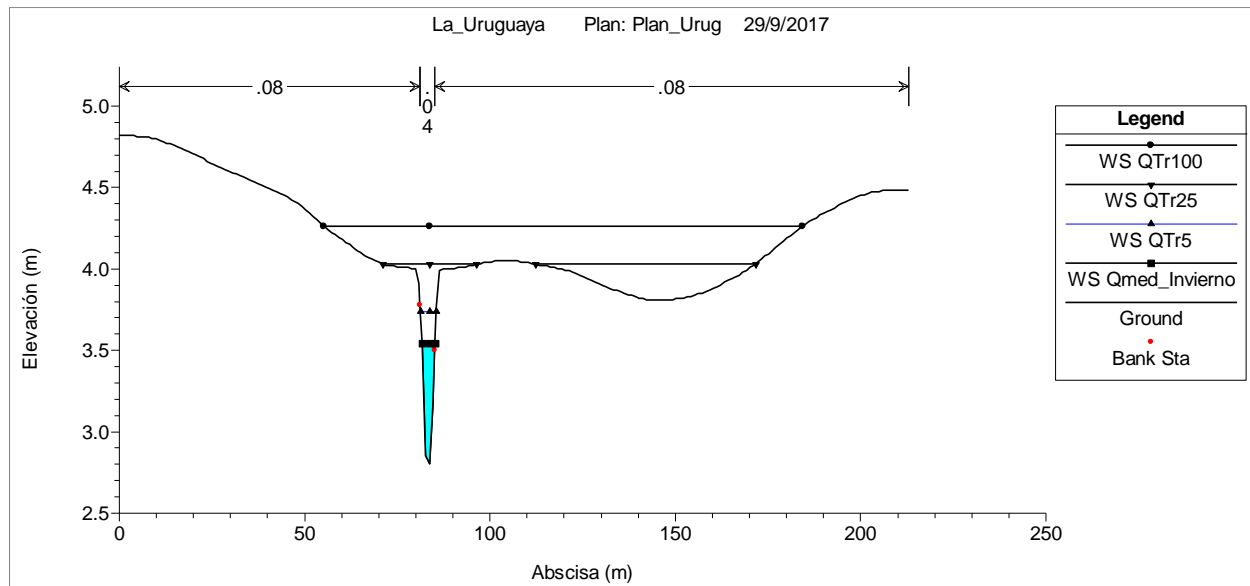
El estero La Uruguaya posee un área de aporte 1.19 km<sup>2</sup>. Está constituido por un estero principal cuya longitud es de 1.53 km. Se encuentra conectado por dos canales principales y tres canales tributarios cuya longitud total es de 2.53 km y 0.90 km respectivamente. El estero La Uruguaya se encuentra localizado en una zona industrial, por lo que, permite recolectar agua que descargan las industrias. Mediante la simulación se pudo verificar que este estero recolecta agua del estero San Enrique 1.

Una vez realizado la modelación en HEC-RAS del estero La Uruguaya, en la Figura 4-1, se presenta el perfil longitudinal del estero principal, además, en la Figura 4-2, se presenta la sección transversal con los caudales simulados.

**Figura 4-1. Perfil longitudinal de cauce principal del estero La Uruguaya. Perfiles longitudinales para un caudal medio de invierno y caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años.**

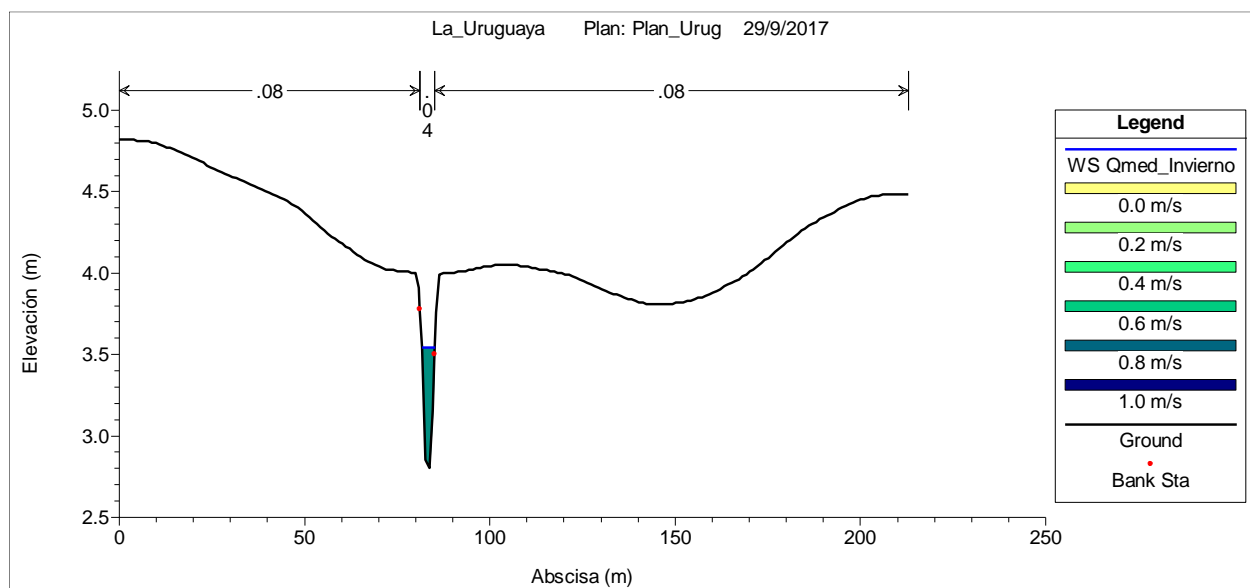


**Figura 4-2. Sección transversal del cauce principal en la abscisa 1+400 m. Perfiles transversales para el caudal medio de invierno y caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años.**



En la Figura 4-3, se presenta la distribución de velocidades del cauce principal y de las planicies de inundación en la abscisa 1+400 m.

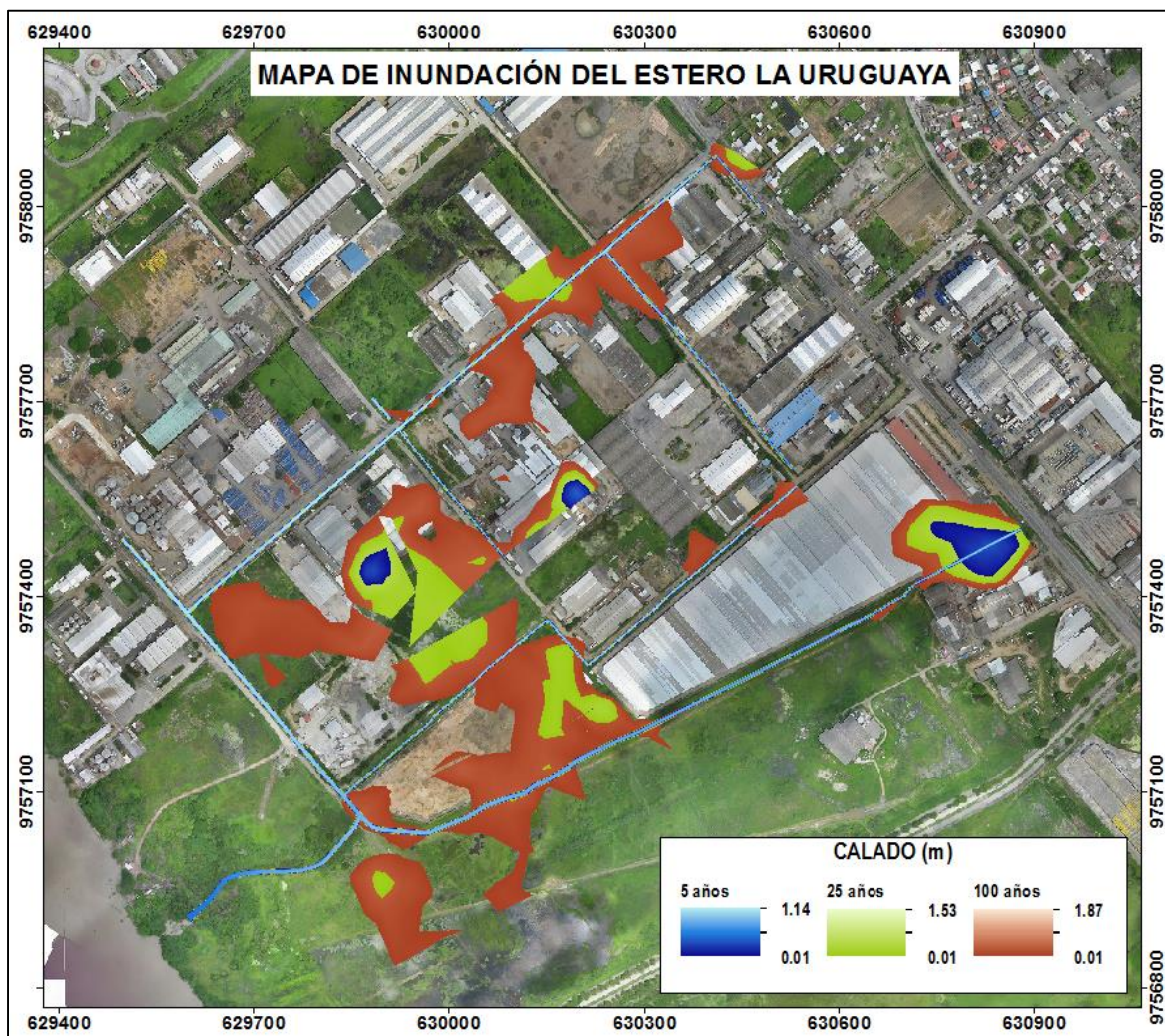
**Figura 4-3. Distribución de velocidades en el cauce principal del estero La Uruguay para el caudal medio de invierno. Sección transversal en la abscisa 1+400.**



En la Figura 4-4, se presenta el mapa de inundación del estero La Uruguay para caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25, 100 años.



**Figura 4-4. Mapa de inundación del estero La Uruguaya con caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años.**



#### 4.1.1.2 Estero El Hospital

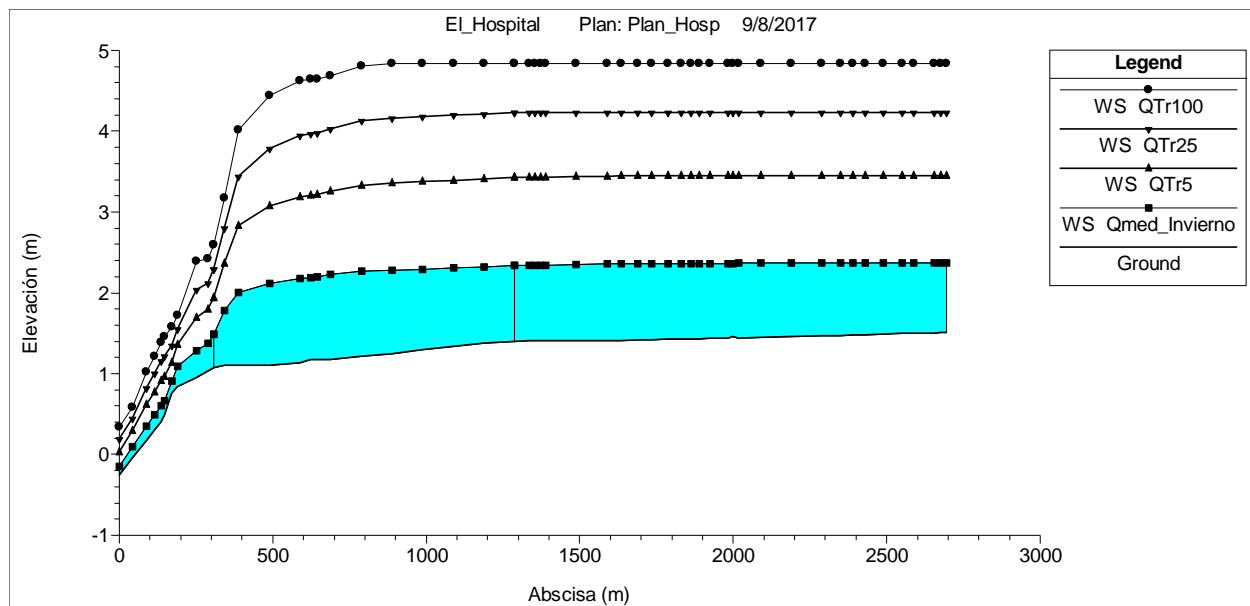
El estero El Hospital tiene un área de aporte de 1.07 km<sup>2</sup>. La longitud del estero principal es de 2.7 km. Está conectado por dos canales tributarios, el primero en la abscisa 1+300.00 m y el segundo en la abscisa 0+300.00 m. La longitud total de los canales tributarios es de 599 m aproximadamente. Aguas arriba del estero principal se encuentra conectado con el estero Las Alforjas, debido a esto, se recolecta agua de este estero; atraviesa en gran parte áreas de producción agrícola como arroz. De acuerdo con el estudio realizado, presenta pendientes bajas a lo largo del cauce principal, lo que provoca que se produzca depositación de sedimentos.

Una vez realizado la modelación en HEC-RAS del estero El Hospital, en la Figura 4-6, se presenta el perfil longitudinal del estero principal, además, en la Figura 4-7, se presenta la sección transversal con los caudales simulados.

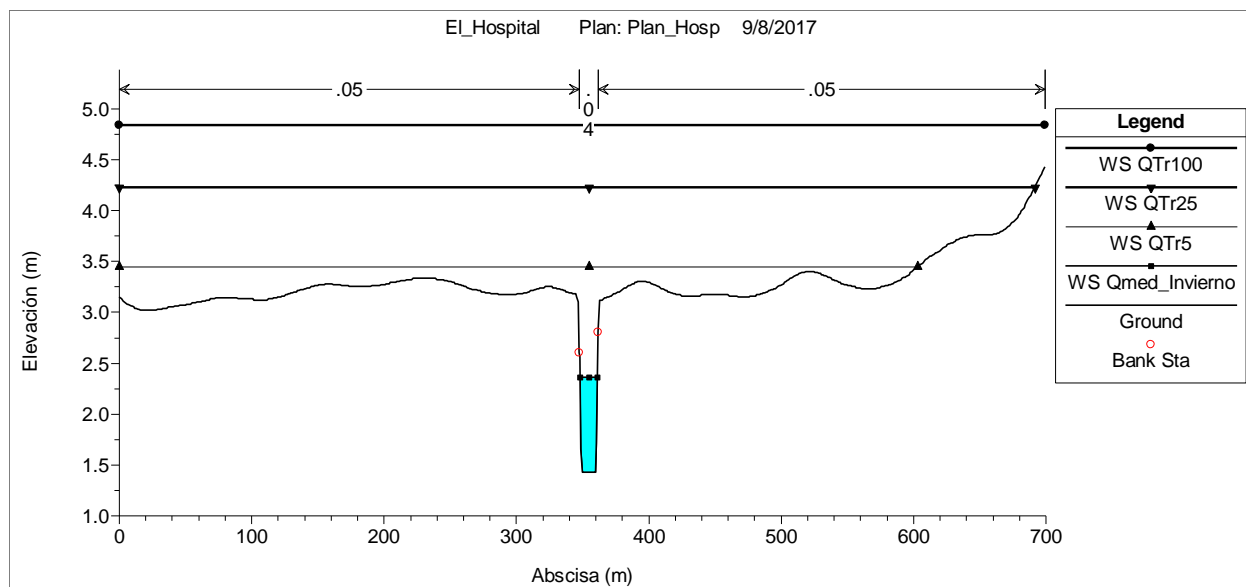
**Figura 4-5. Fotografía del cauce principal del estero El Hospital.**



**Figura 4-6. Perfil longitudinal del cauce principal del estero El Hospital. Perfiles para un caudal medio de invierno y caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años.**

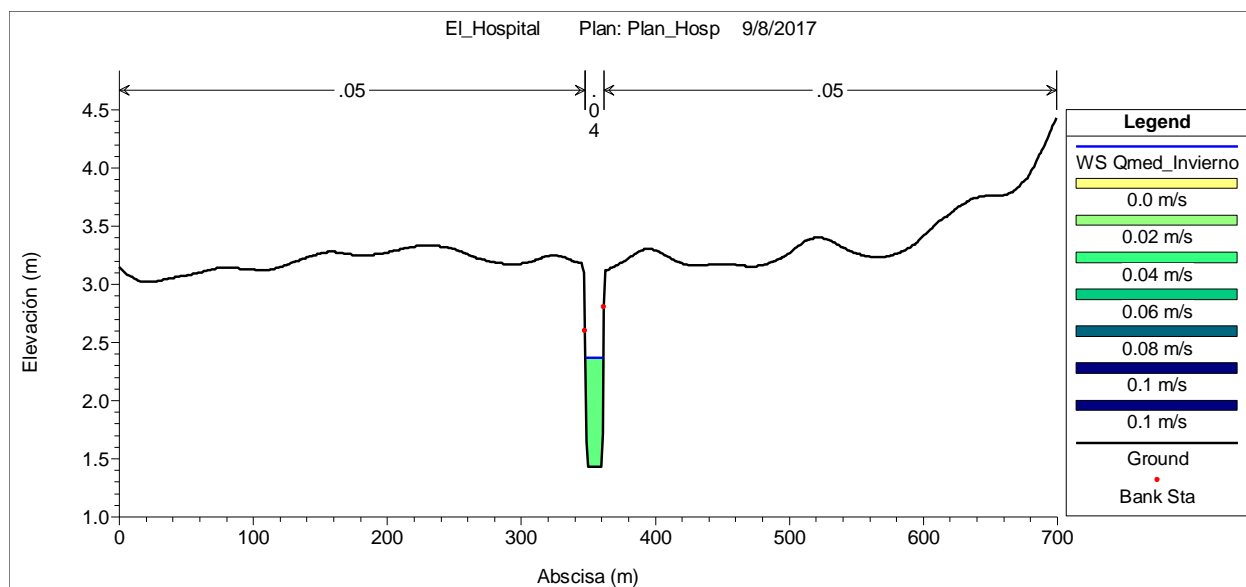


**Figura 4-7. Sección transversal del cauce principal del estero El Hospital en la abscisa 1+800 m. Perfiles transversales para el caudal medio de invierno y caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años.**



En la Figura 4-8, se presenta la distribución de velocidades del cauce principal y de las planicies de inundación en la abscisa 1+800.

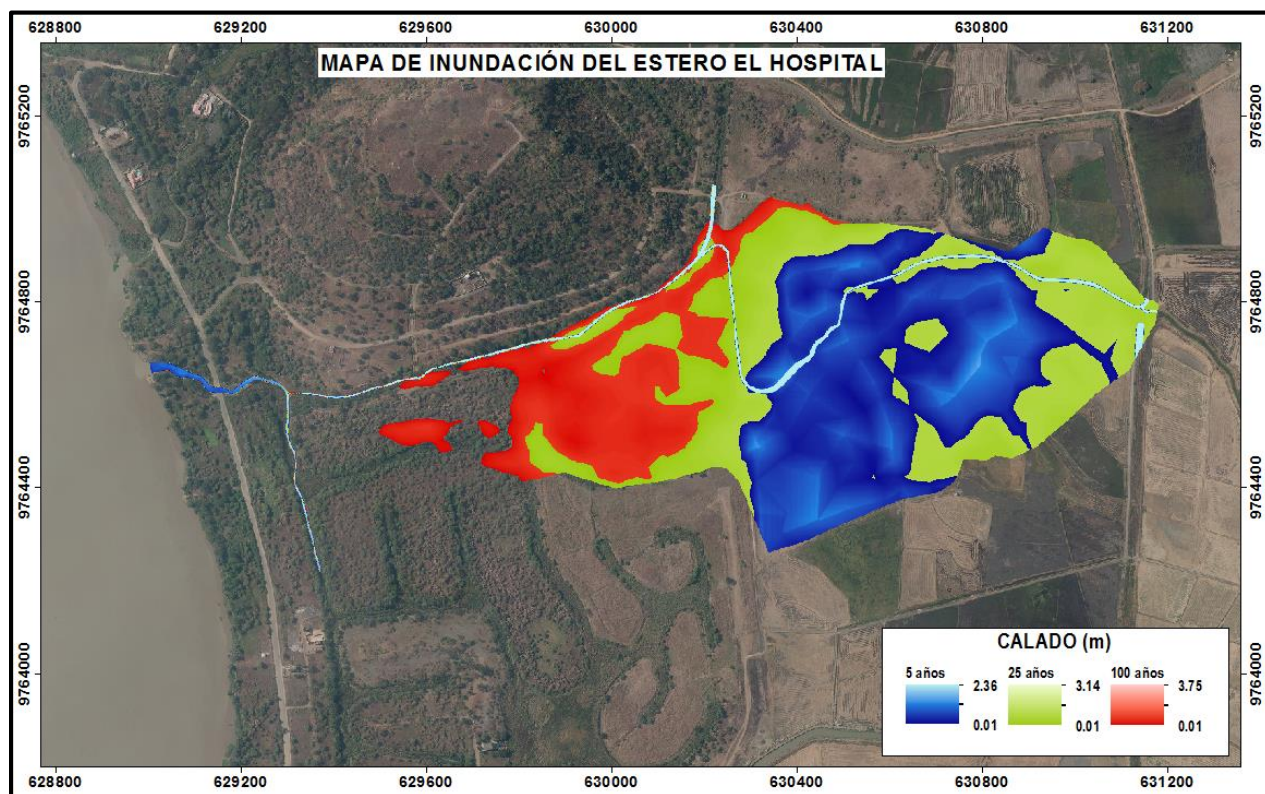
**Figura 4-8. Distribución de velocidades en el cauce principal del estero El Hospital para el caudal medio de invierno. Sección transversal en la abscisa 1+800 m.**



En la Figura 4-9, se presenta el mapa de inundación del estero El Hospital para caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25, 100 años.



**Figura 4-9. Mapa de inundación del estero el Hospital con caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años.**



#### 4.1.1.3 Estero Peñón del Río

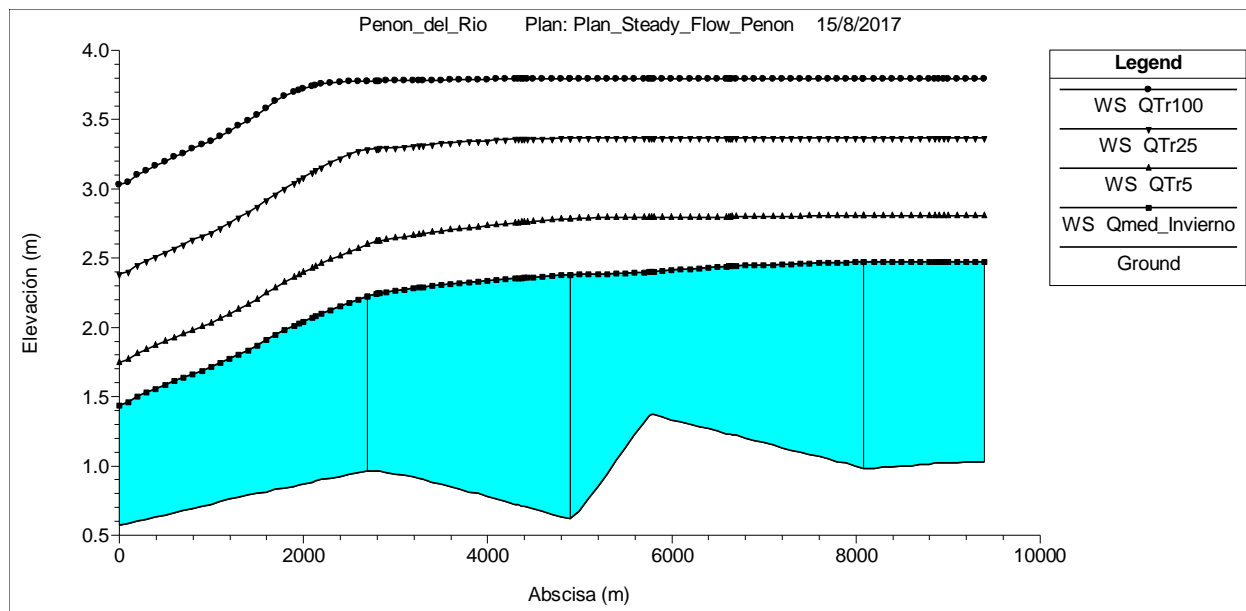
El estero Peñón del Río tiene un área de aporte de 15.22 km<sup>2</sup>. El estero principal tiene una longitud total de 9.4 km. El estero principal está conectado con dos canales tributarios, el primero (Canal Tributario 1) se encuentra en la abscisa 8+000 m y el segundo (Canal Tributario 2) se encuentra en la abscisa 2+300.00 m. Además, está conectado por un canal principal en la abscisa 4+500 m. La longitud total de los canales tributarios es de 1.51 km, mientras que la longitud del canal principal es de 3.39 km aproximadamente. Aguas arriba del canal principal se conecta con el estero El Hospital.

**Figura 4-10. Fotografía del cauce principal del estero Peñón del Río.**

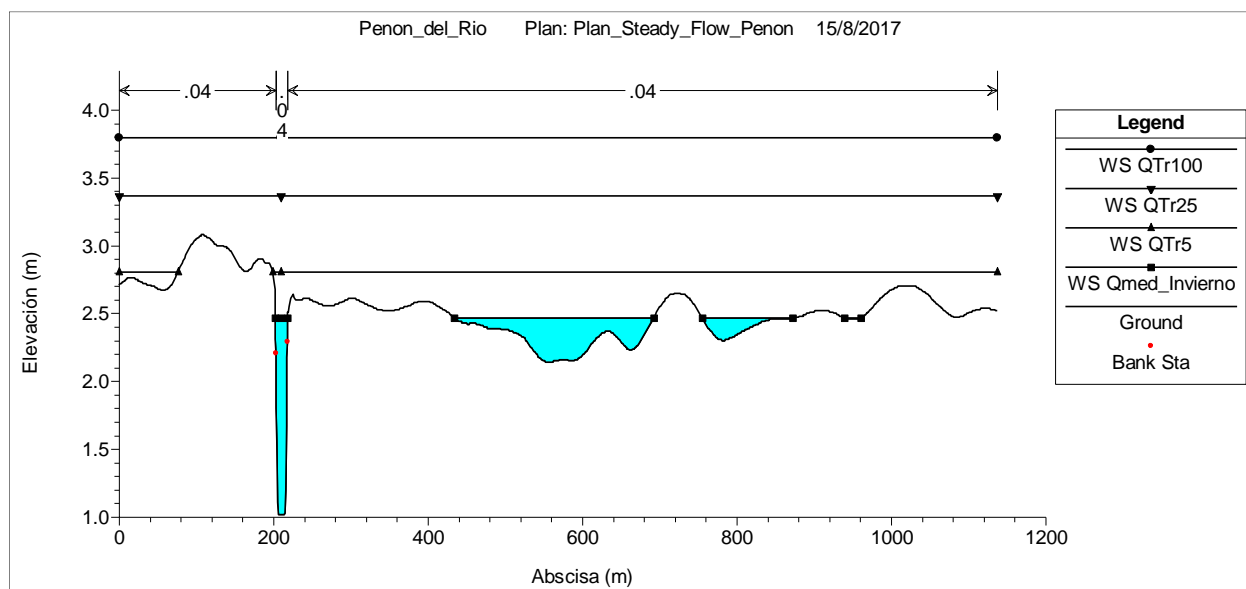


Una vez realizado la modelación en HEC-RAS del estero Peñón del Río, en la Figura 4-11, se presenta el perfil longitudinal del estero principal, además, en la Figura 4-12, se presenta la sección transversal con los caudales simulados.

**Figura 4-11. Perfil longitudinal del cauce principal del estero Peñón del Río. Perfiles para un caudal medio de invierno y caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años.**

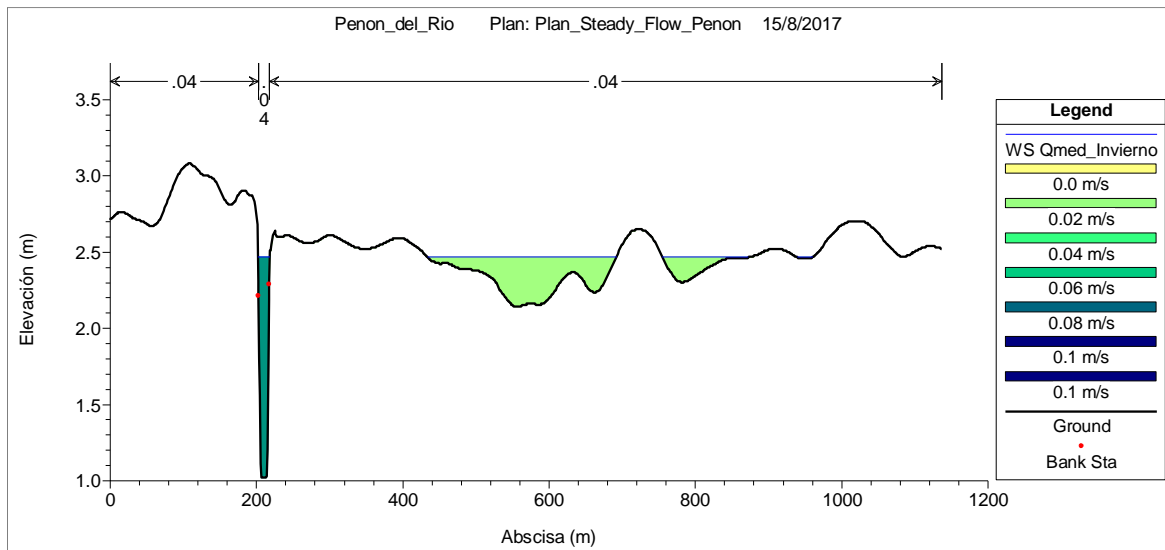


**Figura 4-12. Sección transversal del cauce principal del estero Peñón del Río en la abscisa 7+900 m. Perfiles transversales para el caudal medio de invierno y caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años.**

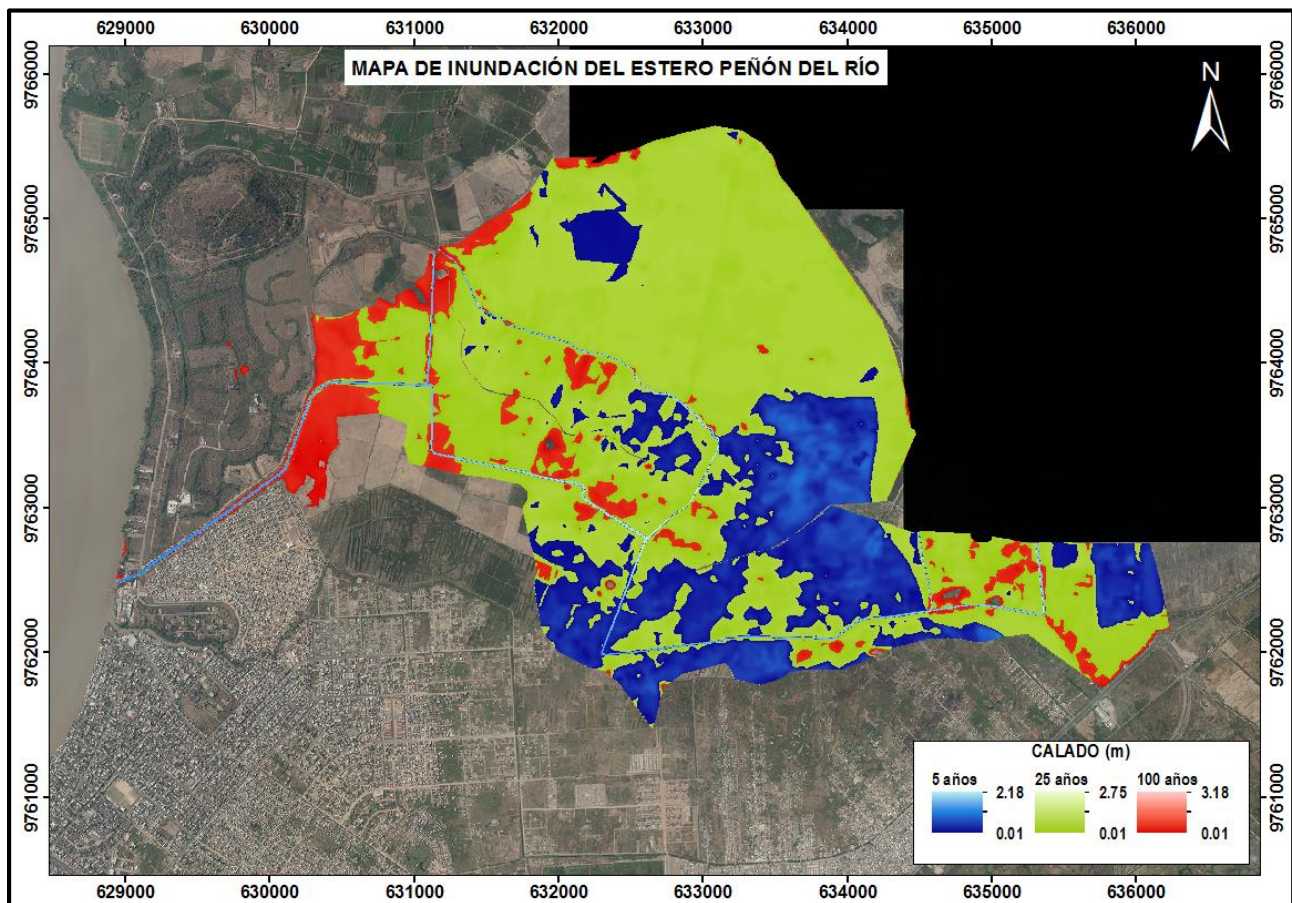


En la Figura 4-13, se presenta la distribución de velocidades del cauce principal y de las planicies de inundación en la abscisa 7+900 m. En la Figura 4-14, se muestra el mapa de inundación del estero Peñón del Río.

**Figura 4-13. Distribución de velocidades en el cauce principal del estero Peñón del Río para el caudal medio de invierno. Sección transversal en la abscisa 7+900 m.**



**Figura 4-14. Mapa de inundación del estero Peñón del Río con caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años.**





#### 4.1.1.4 Estero Don Camilo

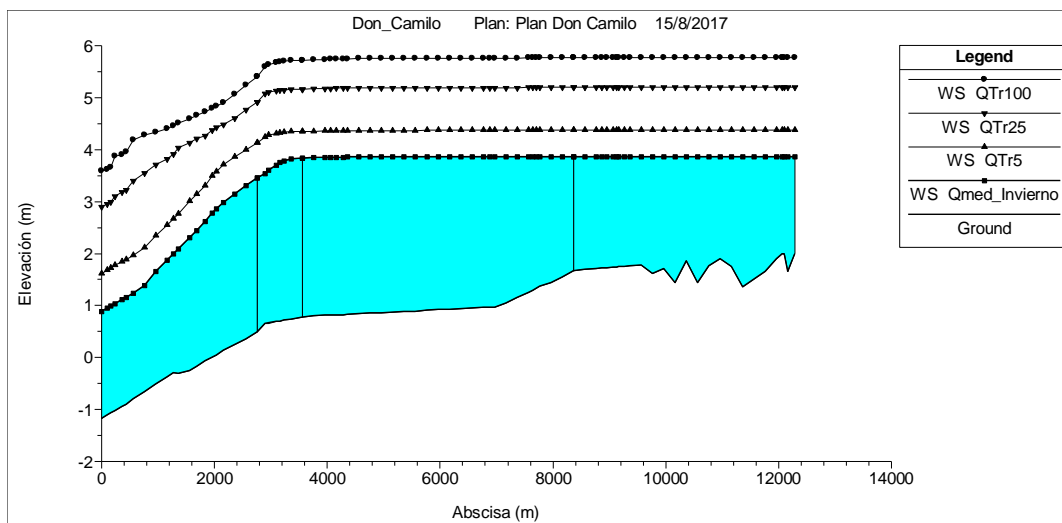
El estero Don Camilo tiene un área de aporte de 73.27 km<sup>2</sup>. Este está constituido por dos cauces principales que se intersecan y forman uno solo, el cual desemboca en el río Guayas. El estero principal 1 tiene una longitud 9.7 km, mientras que el estero principal 2 tiene una longitud de 9.52 km. Al estero principal 2 se conectan dos canales principales; el canal principal 1 se conecta en la abscisa 3+895 m, cuya longitud es de 5.07 km; el canal principal 2 se conecta en la abscisa 8+671 m y su longitud es de 3.52 km aproximadamente. Tiene un caudal medio de invierno de 67.84 m<sup>3</sup>/s, el mayor de todos los esteros. Mediante el estudio del perfil longitudinal se puede observar que tiene pendientes suaves, lo cual permite que el flujo no tenga cambios bruscos a lo largo del estero principal. Atraviesa en su mayor parte cultivos de arroz y un tipo de vegetación herbácea común en la zona.

**Figura 4-15. Fotografía del cauce principal del estero Don Camilo.**

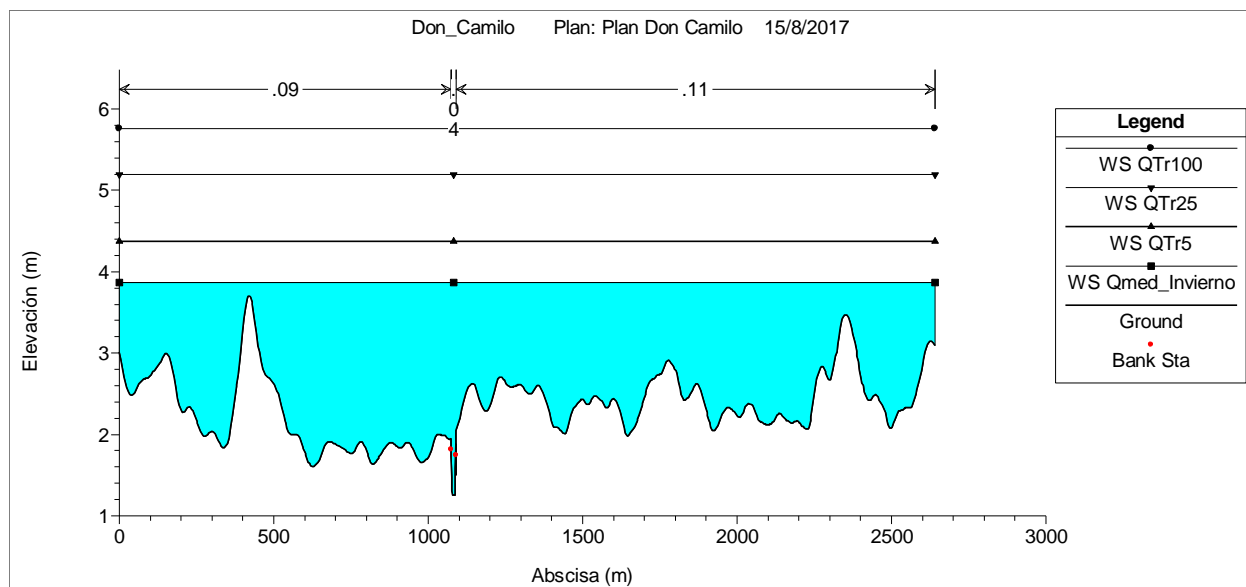


Una vez realizado la modelación en HEC-RAS del estero Don Camilo, en la Figura 4-16, se presenta el perfil longitudinal del estero principal, además, en la Figura 4-17, se presenta la sección transversal con los caudales simulados

**Figura 4-16. Perfil longitudinal del cauce principal 1 del estero Don Camilo. Perfiles para un caudal medio de invierno y caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años.**

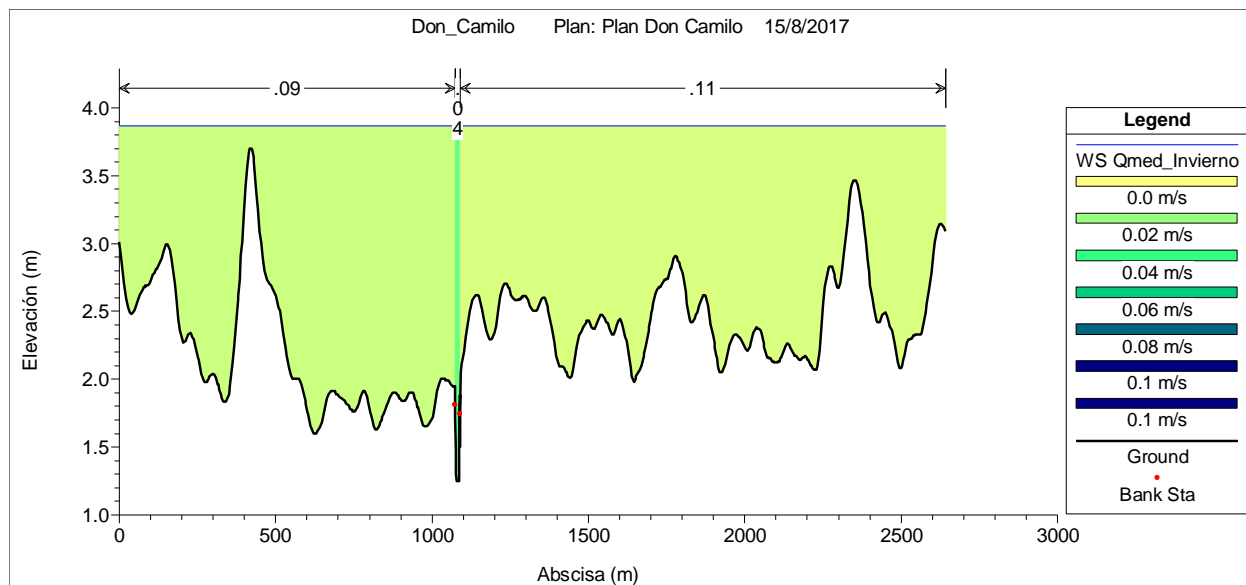


**Figura 4-17. Sección transversal del cauce principal 1 del estero Don Camilo en la abscisa 4+800 m. Perfiles transversales para el caudal medio de invierno y caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años.**



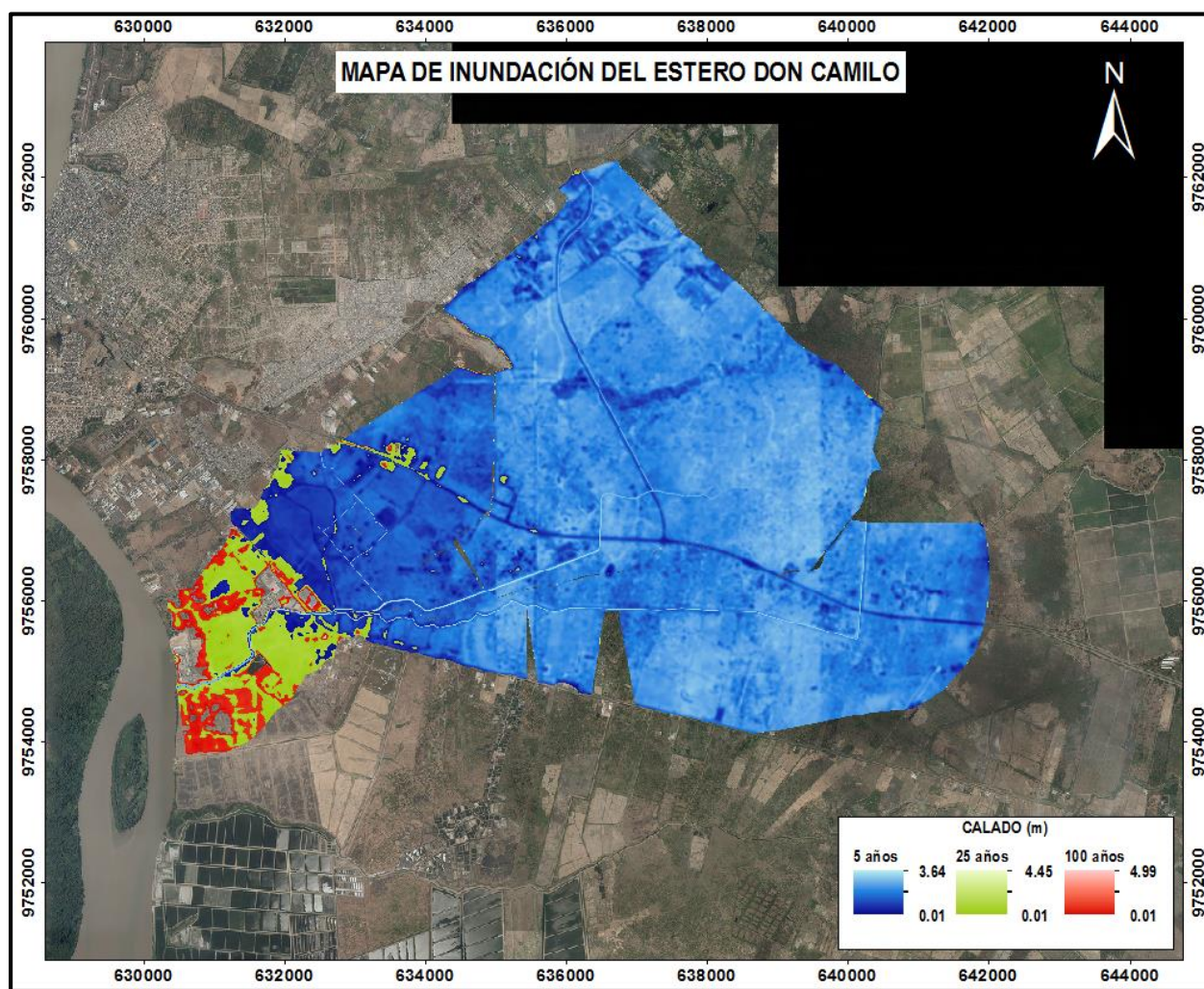
En la Figura 4-18, se presenta la distribución de velocidades del cauce principal y de las planicies de inundación en la abscisa 4+800 m.

**Figura 4-18. Distribución de velocidades en el cauce principal 1 del estero Don Camilo para el caudal medio de invierno. Sección transversal en la abscisa 4+800 m.**



En la Figura 4-19, se presenta el mapa de inundación del estero Don Camilo para caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25, 100 años.

**Figura 4-19. Mapa de inundación del estero Don Camilo con caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años**

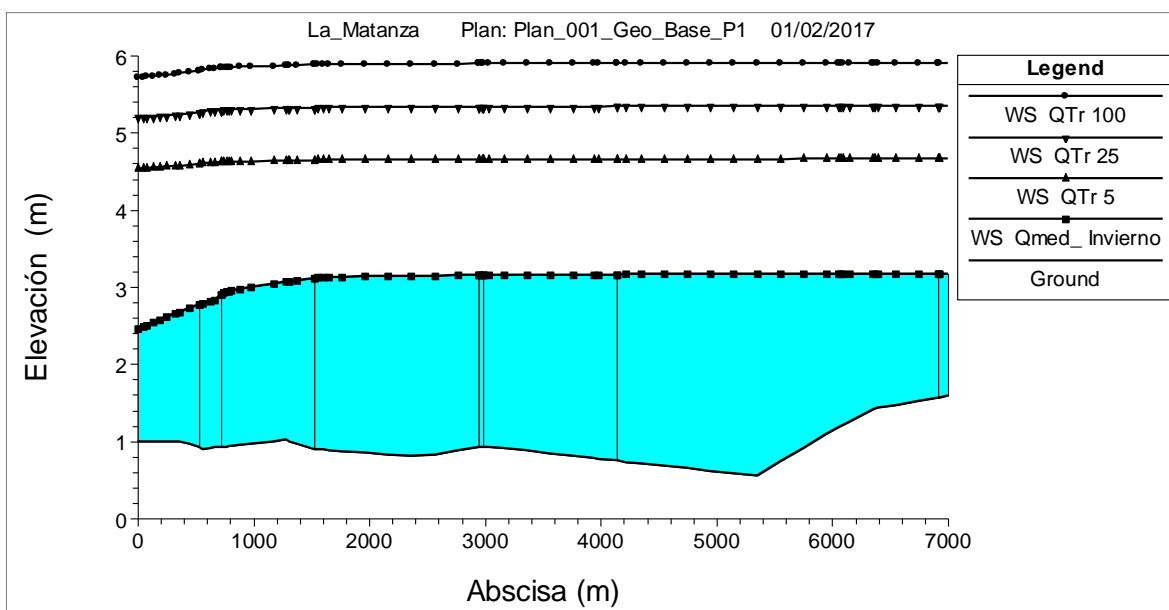


#### 4.1.1.5 Estero La Matanza

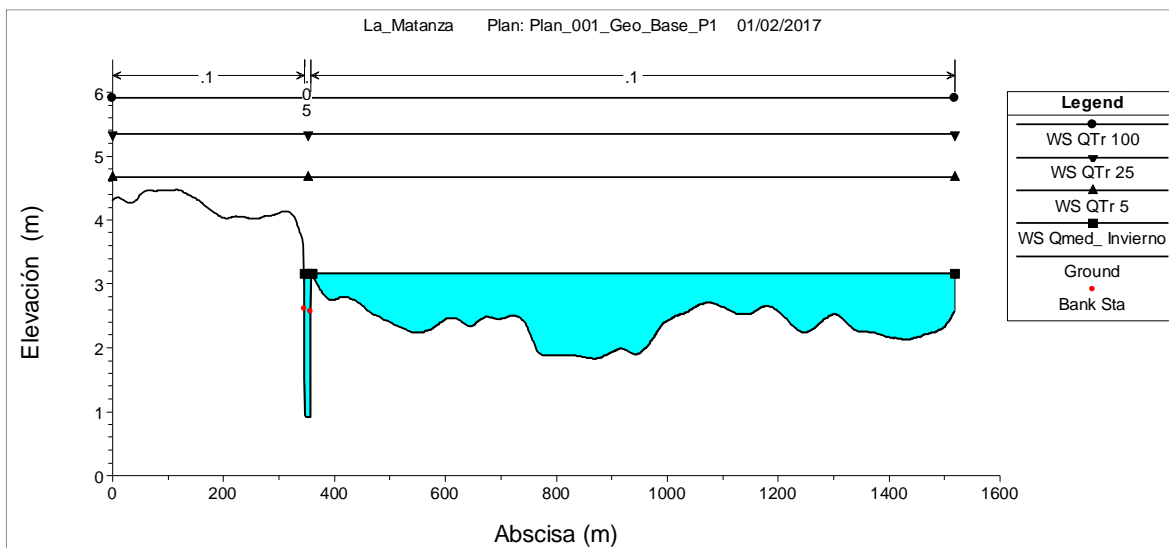
El estero La Matanza que cruza adyacente al área urbana del Cantón Durán, tiene una longitud 9689 m en el cauce principal. Consta de 7 canales principales y 9 canales tributarios, que se conectan hacia el estero principal. El estero La Matanza tiene un área de aporte de 157.00 km<sup>2</sup>. A lo largo del estero principal y los canales hay múltiples estructuras transversales de paso del flujo, que en su mayoría son alcantarillas. El estero en la mayoría de su longitud tiene pendientes bajas provocando que se deposite sedimentos.

Una vez realizado la simulación en HEC-RAS del estero La Matanza, en la Figura 4-20, se presenta el perfil longitudinal del estero principal, además, en la Figura 4-21, se presenta la sección transversal con los caudales simulados.

**Figura 4-20. Perfil longitudinal del cauce principal del estero La Matanza. Perfiles para el caudal medio de invierno y caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años.**



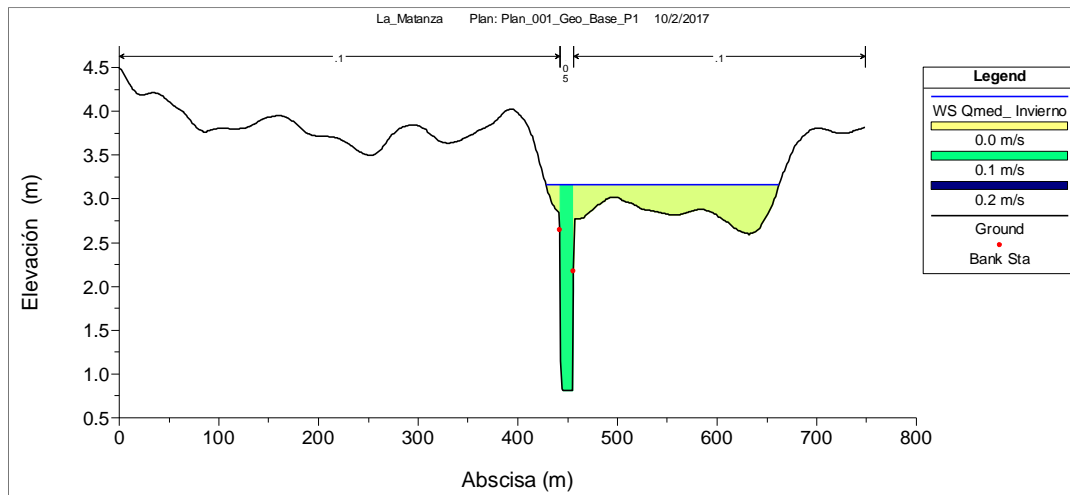
**Figura 4-21. Sección transversal del cauce principal del estero La Matanza en la abscisa 7 + 991.64 m. Perfiles transversales para el caudal medio de invierno y caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años.**



En la Figura 4-22, se presenta la distribución de velocidades del cauce principal y de las planicies de inundación en la abscisa 5 + 991.63 m.

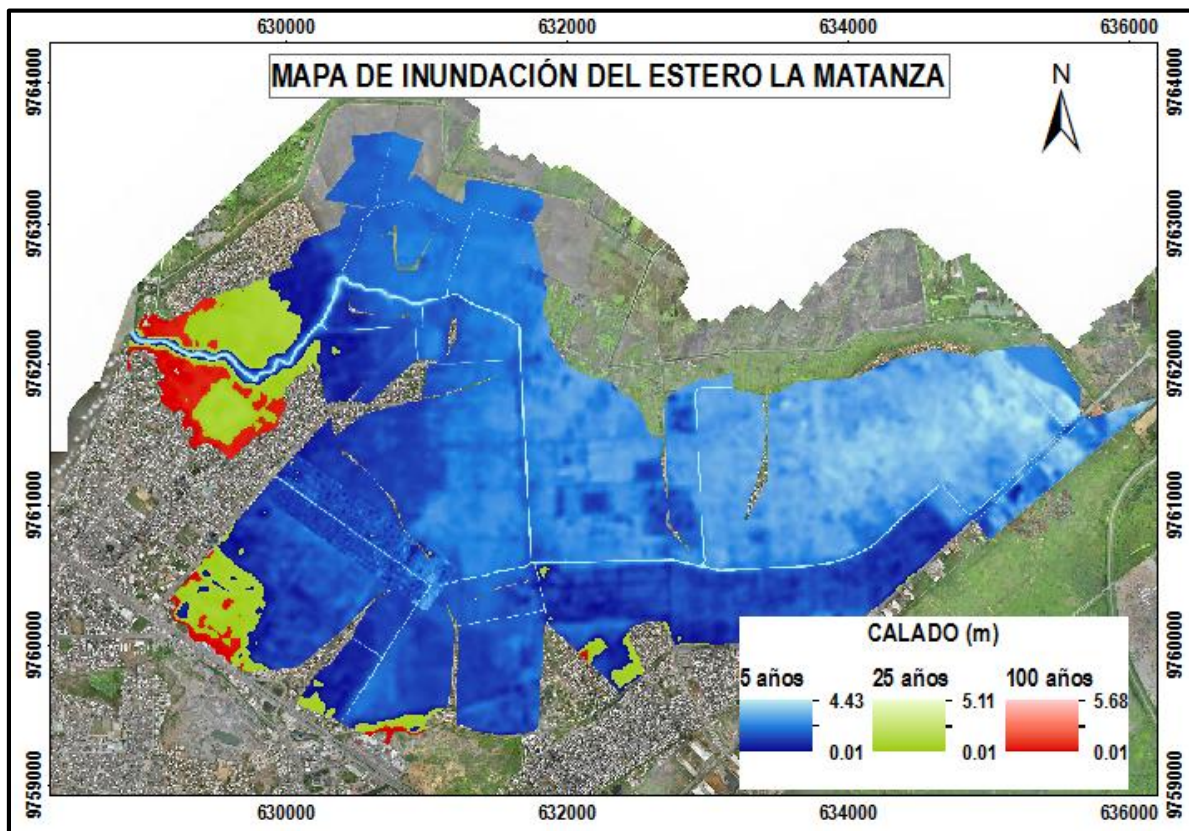


**Figura 4-22. Distribución de velocidades en el cauce principal del estero La Matanza para para el caudal medio de invierno. sección transversal en la abscisa 5 + 991.63 m.**



En la Figura 4-23, se presenta el mapa de inundación del estero La Matanza para caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25, 100 años.

**Figura 4-23. Mapa de inundación del estero La Matanza con caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años**



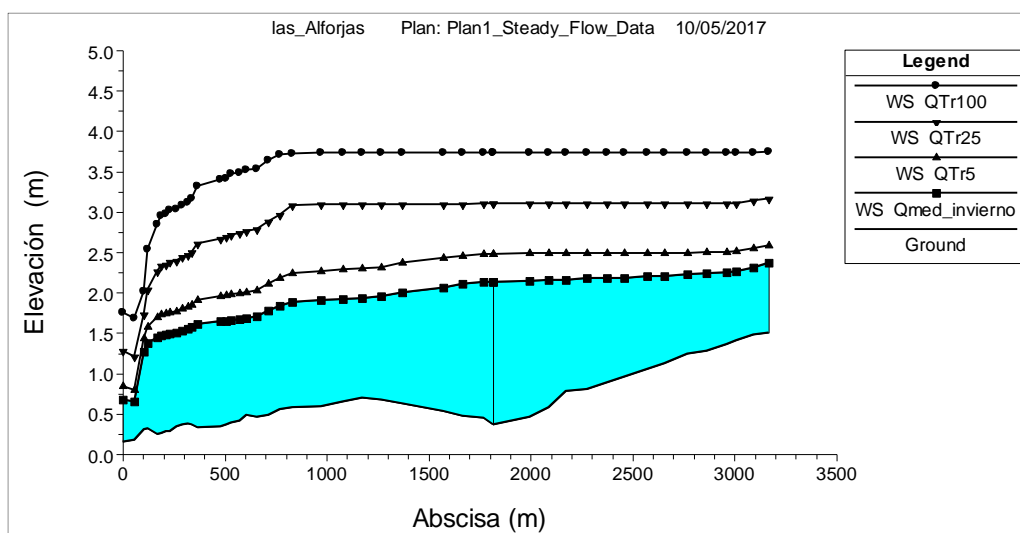


#### 4.1.1.6 Estero Las Alforjas

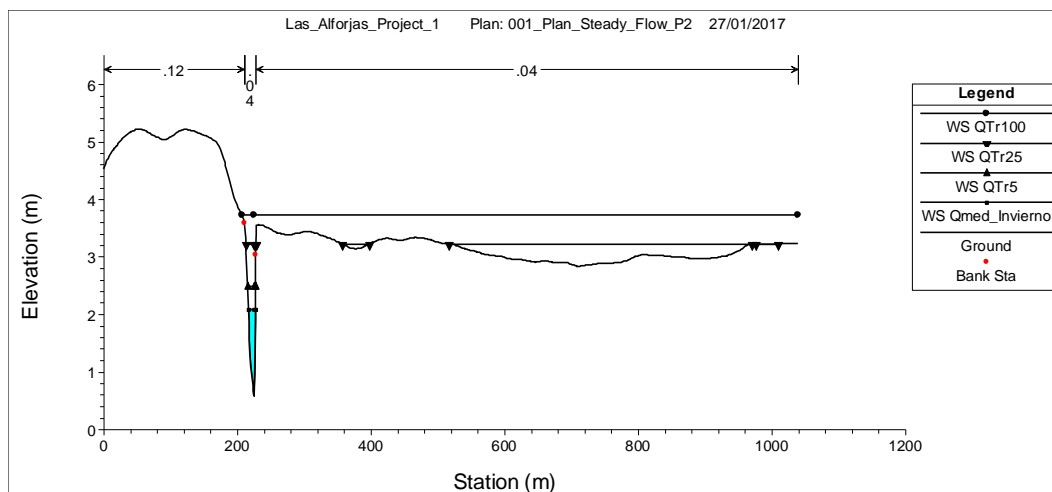
El estero Las Alforjas tiene una longitud 3204 m del cauce principal con un canal tributario de 259 m, que intercepta al estero principal en la abscisa 1 + 864.96 m. Tiene un área de aporte de 3.41 km<sup>2</sup>. Aguas arriba se conecta con el estero El Hospital, y presenta un encauzamiento a lo largo de la vía, además, atraviesa en gran parte áreas de producción agrícola como arroz. Aguas abajo presenta una sinuosidad producto de procesos de inundación por escorrentía directa y por la entrada de mareas al estero. Como resultado de los procesos morfológicos y de inundación el cauce presenta pendientes bajas, lo que genera la depositación de sedimentos.

Una vez realizado la simulación en HEC-RAS del estero Las Alforjas, en la Figura 4-24, se presenta el perfil longitudinal del estero principal, además, en la Figura 4-25, se presenta la sección transversal con los caudales simulados.

**Figura 4-24. Perfil longitudinal del cauce principal del estero Las Alforjas. Perfiles para el caudal medio de invierno y caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años.**

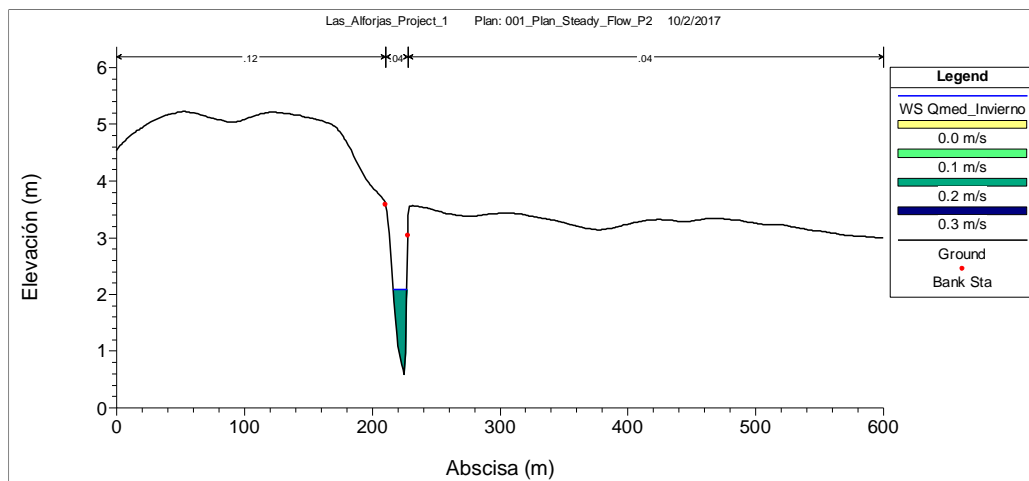


**Figura 4-25. Sección transversal del estero principal, abscisa 2 + 097.79 m. Perfiles para los caudales medio de invierno y caudales de periodos de retorno de 5, 25 y 100 años.**

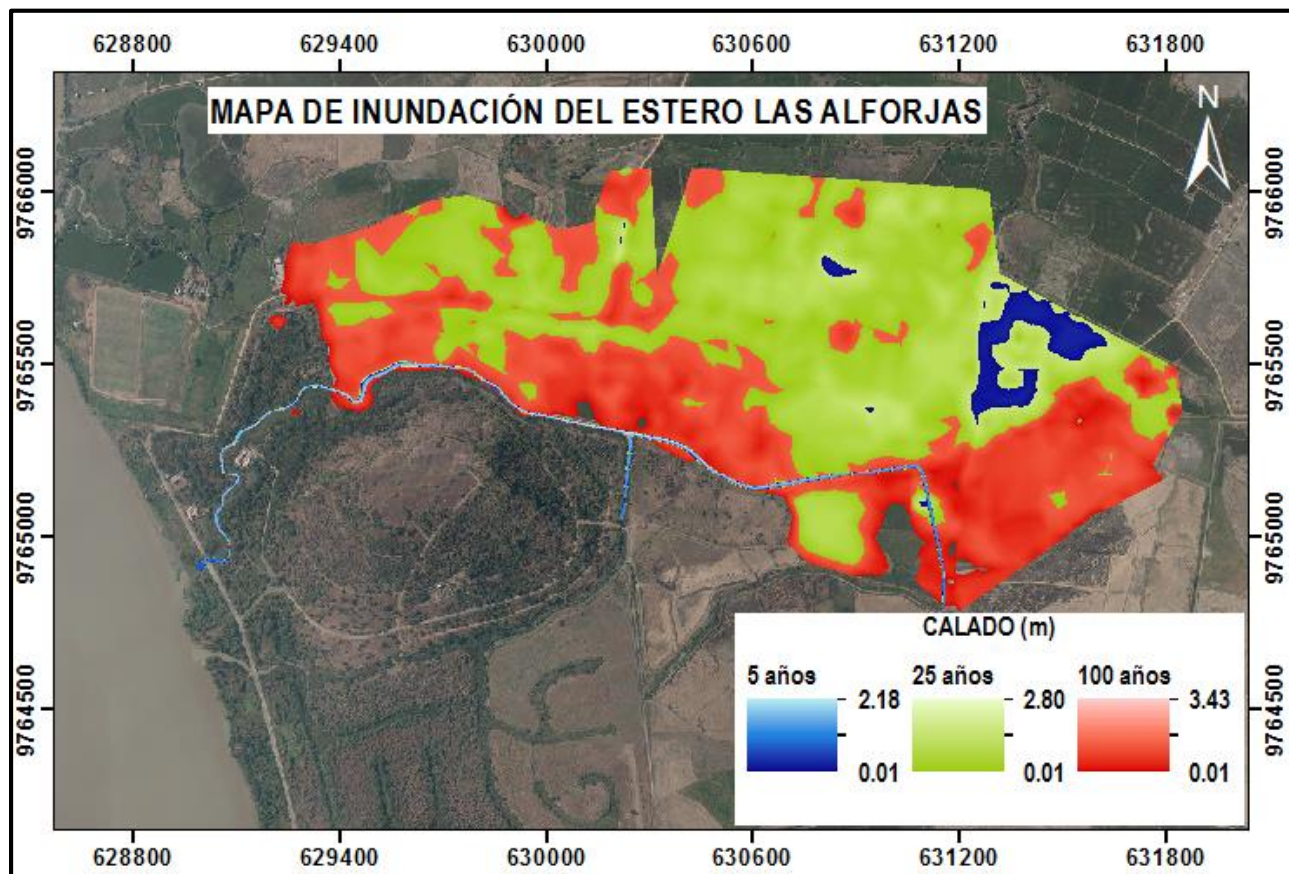


En la Figura 4-26, se presenta la distribución de velocidades del cauce principal y de las planicies de inundación en la abscisa 2 + 097.79 m. En la Figura 4-27, se muestra el mapa de inundación del estero Las Alforjas.

**Figura 4-26. Distribución de velocidades en el cauce principal del estero Las Alforjas para el caudal medio de invierno. sección transversal en la abscisa 2 + 097.79 m.**



**Figura 4-27. Mapa de inundación del estero Las Alforjas con caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años**



#### 4.1.1.7 Estero San Enrique

El estero San Enrique en función de las áreas de aporte se lo ha dividido en 2 partes. Estos esteros se encuentran interconectados por un canal. En general, el estero San Enrique (*los dos cauces*) tiene un área de aporte de 7.84 km<sup>2</sup>.

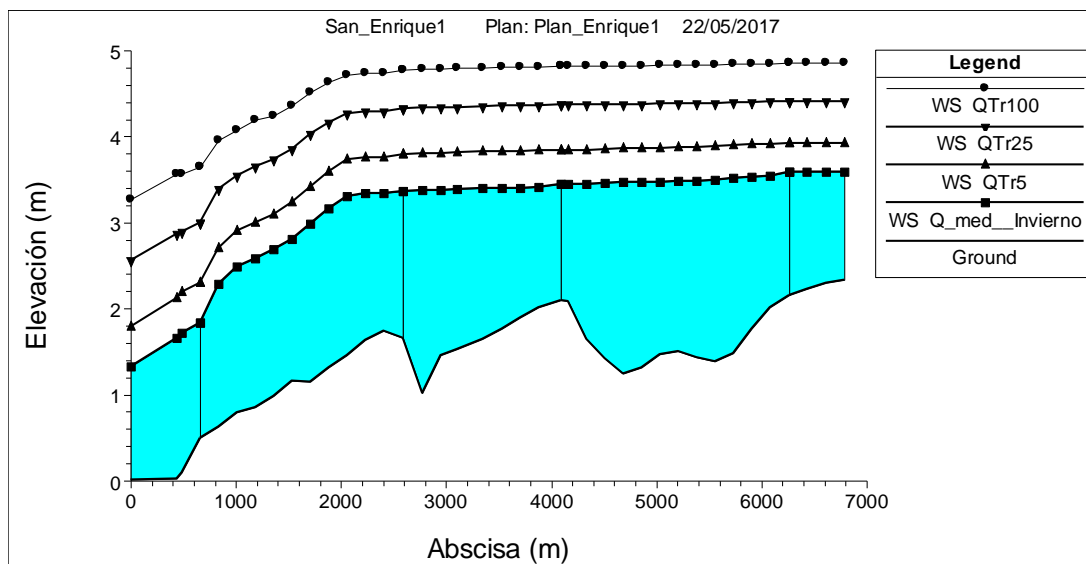
Para efectos del estudio, al estero San Enrique se lo dividió en San Enrique 1 y San Enrique 2. El estero San Enrique 1 tiene una longitud 600 m en el cauce principal, se conectan hacia el estero principal 2 canales principales y 3 canales tributarios. Al realizar una comparación con cartas topográficas del cauce natural, este estero conserva en gran medida la sinuosidad natural, aguas abajo en la desembocadura en el río Guayas.

**Figura 4-28. Fotografía del cauce principal del estero San Enrique.**

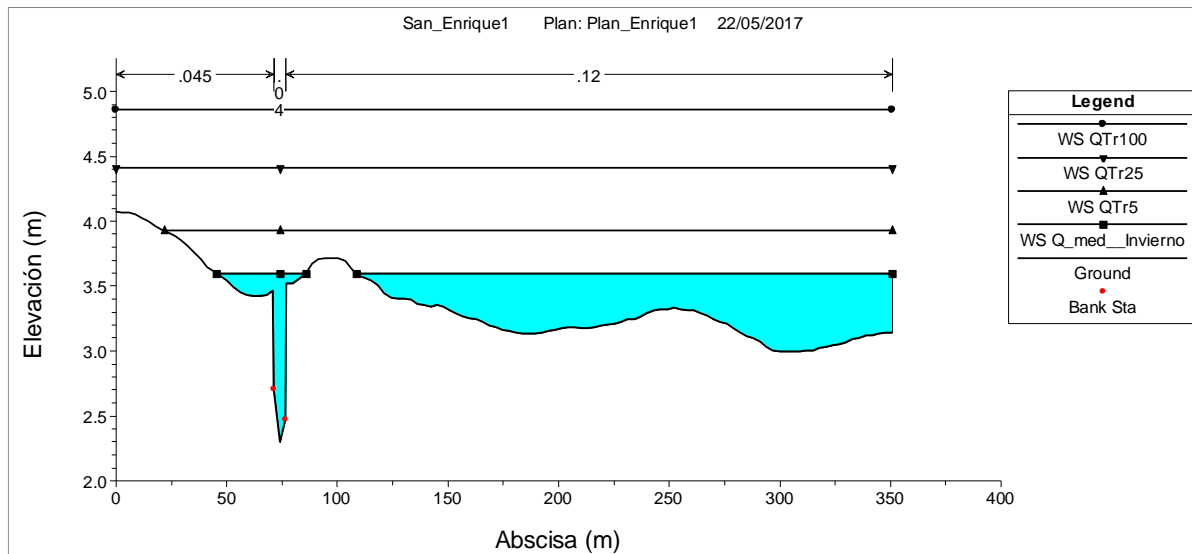


Una vez realizado la simulación en HEC-RAS del estero San Enrique 1, en la Figura 4-29, se presenta el perfil longitudinal del estero principal, además, en la Figura 4-30, se presenta la sección transversal con los caudales simulados.

**Figura 4-29. Perfil longitudinal del cauce principal del estero San Enrique 1. Perfiles para el caudal medio de invierno y caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años.**

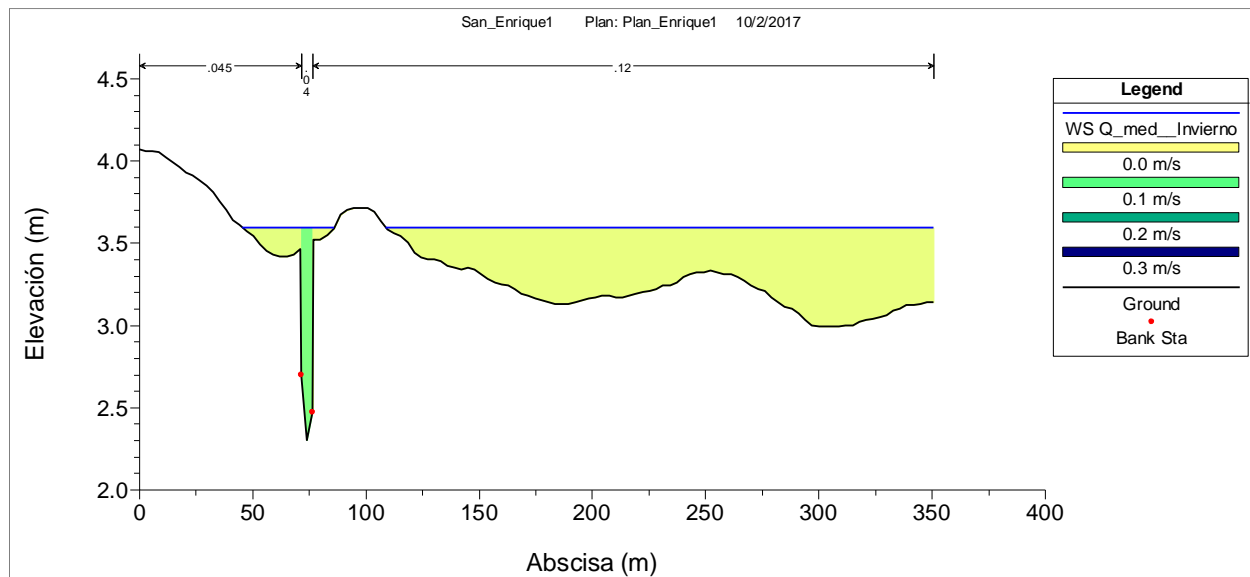


**Figura 4-30. Sección transversal del estero principal, abscisa 6 + 432.90 m. Perfiles para los caudales medio mensual de invierno y caudales de periodos de retorno de 5, 25 y 100 años.**



En la Figura 4-31, se presenta la distribución de velocidades del cauce principal y de las planicies de inundación en la abscisa 6 + 432.90 m.

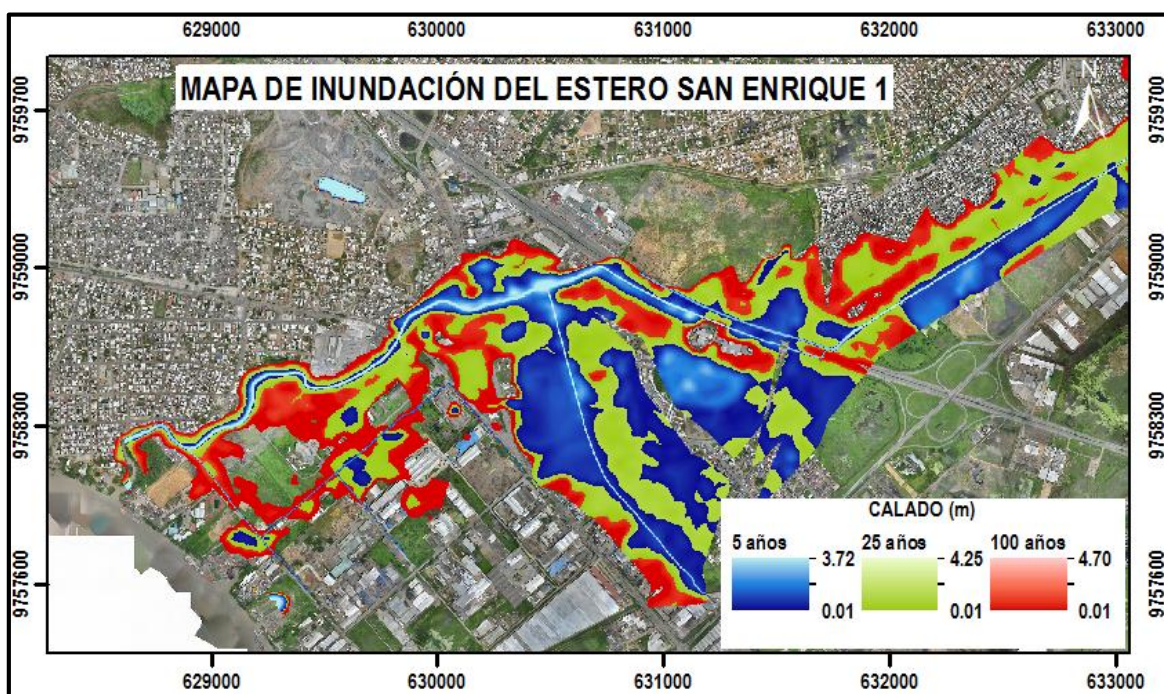
**Figura 4-31. Distribución de velocidades en el cauce principal del estero San Enrique 1 para el caudal medio de invierno. Sección transversal en la abscisa 6+ 432.90 m.**



En la Figura 4-32, se presenta el mapa de inundación del estero San Enrique 1 para caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25, 100 años.



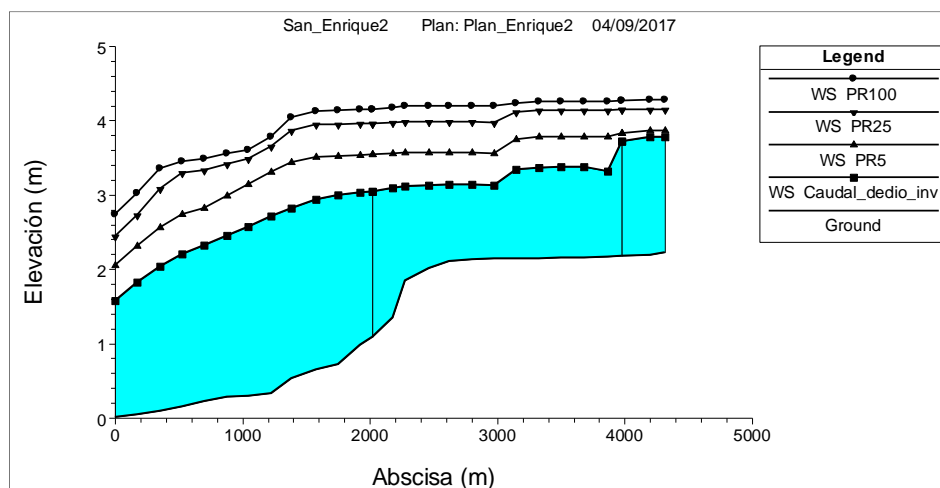
**Figura 4-32. Mapa de inundación del estero San Enrique 1 con caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años**



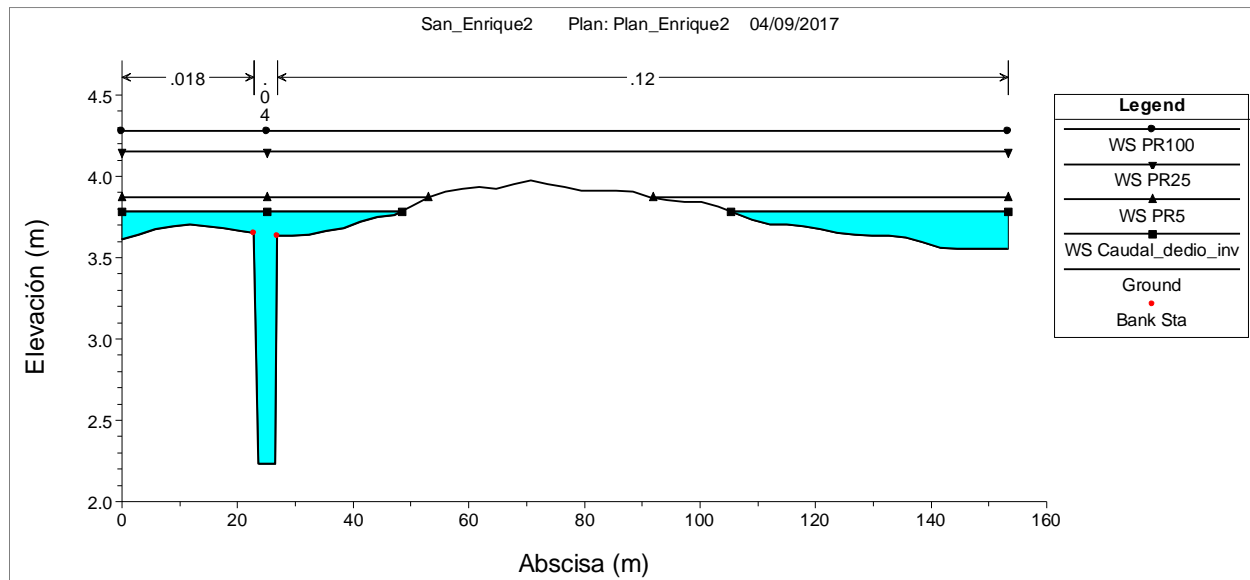
El estero San Enrique 2 tiene una longitud del cauce principal de 4600 m; cuenta con 4 canales tributarios que se conectan directamente en el cauce principal y cumplen la función de recolectar el agua lluvia del otro lado de la vía. El estero San Enrique 2, en base a los resultados del estudio, cumple la función de aliviar o disminuir la cantidad de lluvia en el cauce del estero San Enrique 1, y con esto disminuir el nivel de agua en el terreno.

Una vez realizado la simulación en HEC-RAS del estero San Enrique 2, en la Figura 4-33, se presenta el perfil longitudinal del estero principal, además, en la Figura 4-34, se presenta la sección transversal con los caudales simulados.

**Figura 4-33. Perfil longitudinal del cauce principal del estero San Enrique 2. Perfiles para el caudal medio de invierno y caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años.**

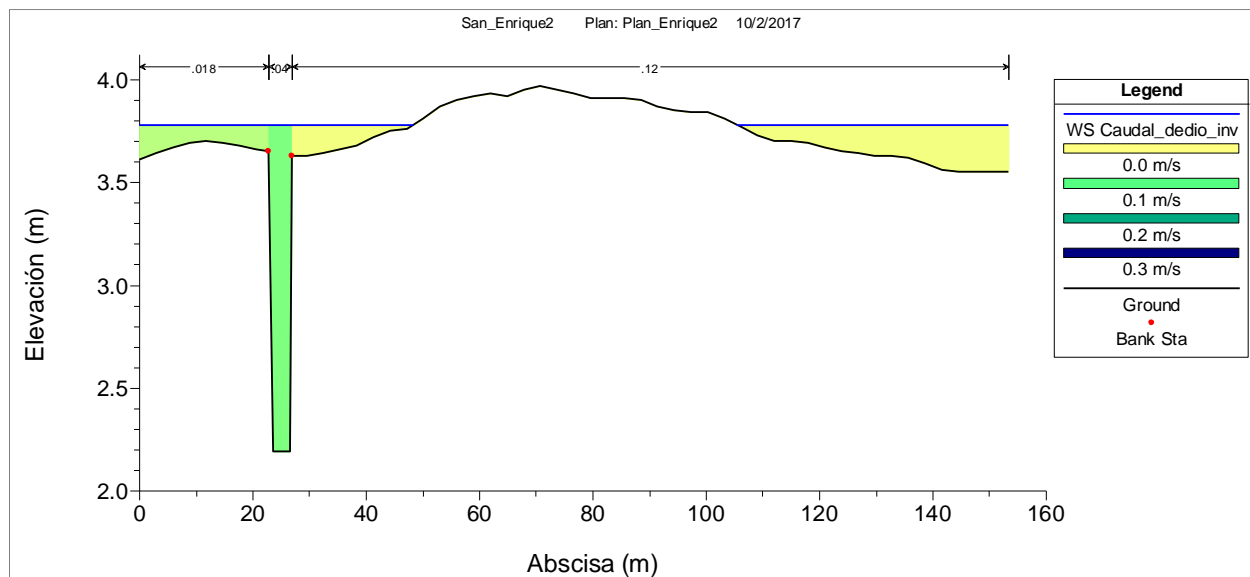


**Figura 4-34. Sección transversal del estero principal, abscisa 4 + 365.40 m. Perfiles para los caudales medio mensual de invierno y caudales de periodos de retorno de 5, 25 y 100 años.**



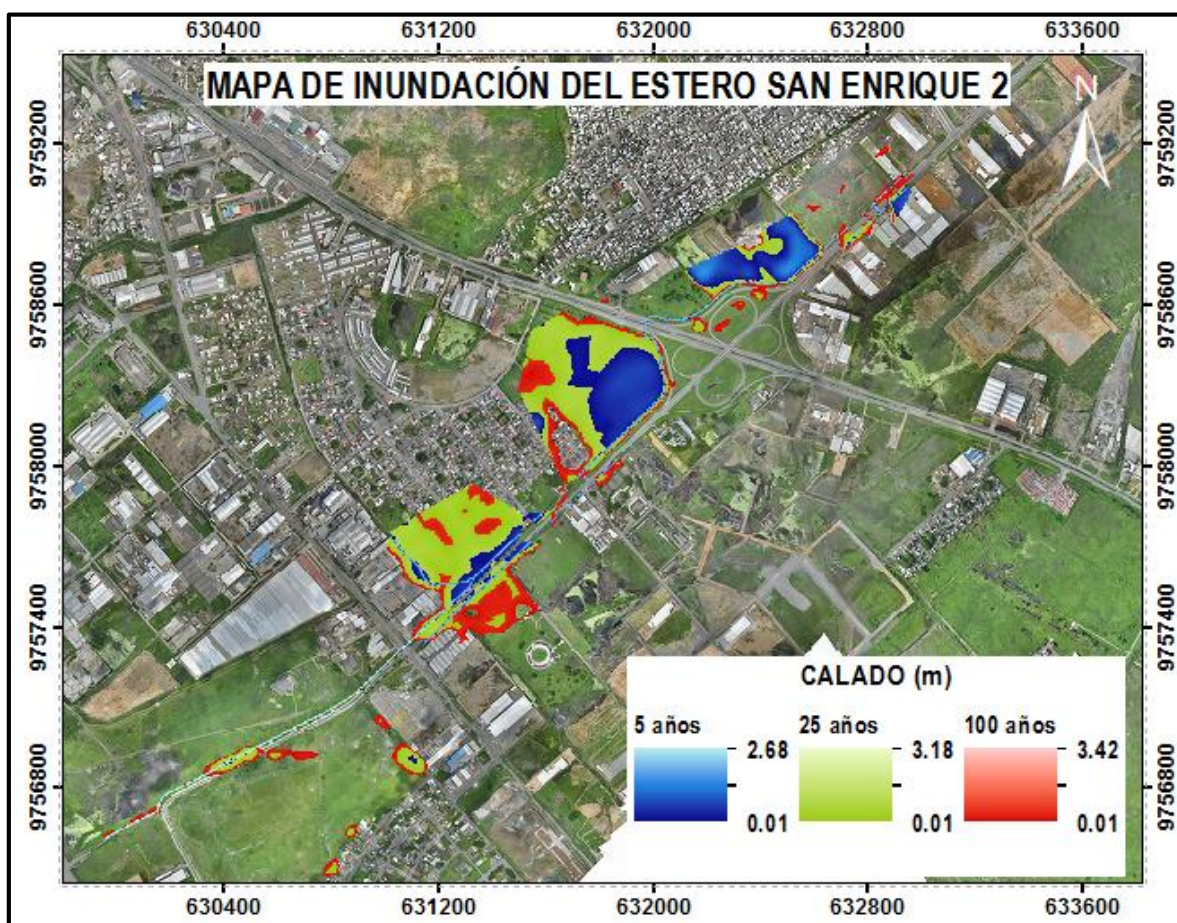
En la Figura 4-35, se presenta la distribución de velocidades del cauce principal y de las planicies de inundación en la abscisa 4 + 635.40 m.

**Figura 4-35. Distribución de velocidades en el cauce principal del estero San Enrique 2, para para el caudal medio de invierno. sección transversal en la abscisa 4 + 365.40 m.**



En la Figura 4-36, se presenta el mapa de inundación del estero San Enrique 2 para caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25, 100 años.

**Figura 4-36. Mapa de inundación del estero Las Alforjas con caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años.**



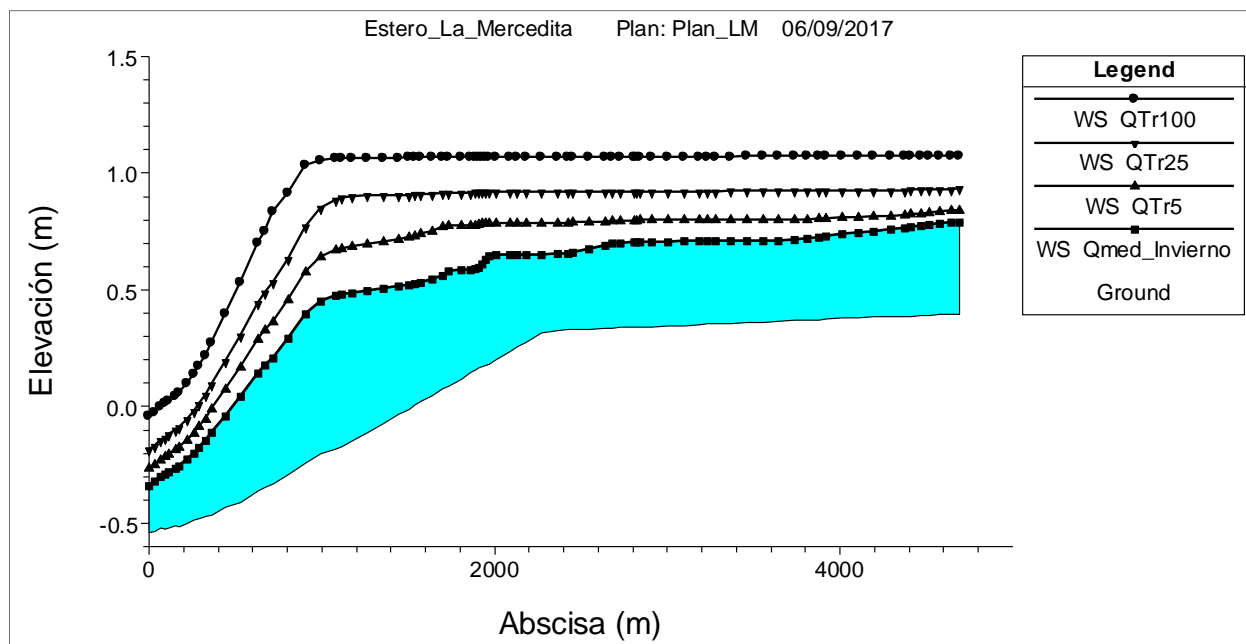
#### 4.1.1.8 Estero La Mercedita

Finalmente, aguas abajo del río Guayas desemboca el estero La Mercedita, que en su mayoría atraviesa zonas agrícolas y ganaderas. Este estero tiene un solo cauce de 17000 m de longitud. Tiene un área de aporte de 63 km<sup>2</sup>. Aguas abajo presenta una sinuosidad producto de procesos de inundación por escorrentía directa y por la entrada de mareas al estero. En esa zona se encuentran industrias camaroneras que captan agua del estero y también vierten agua hacia el mismo, consigo los residuos de la actividad piscícola. El perfil Longitudinal presenta dos pendientes marcadas, siendo mayor aguas abajo, que genera mayores velocidades de flujo.

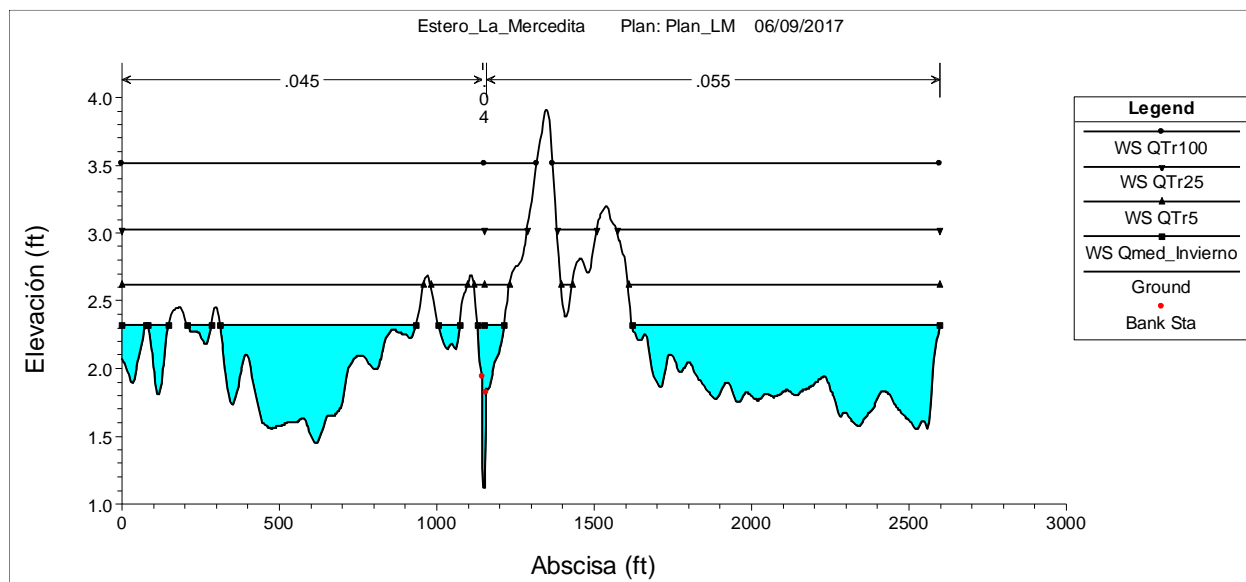
Una vez realizado la simulación en HEC-RAS del estero La Mercedita, en la Figura 4-37, se presenta el perfil longitudinal del estero principal, además, en la Figura 4-38, se presenta la sección transversal con los caudales simulados.



**Figura 4-37. Perfil longitudinal del cauce principal del estero La Mercedita. Perfiles para el caudal medio de invierno y caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años.**



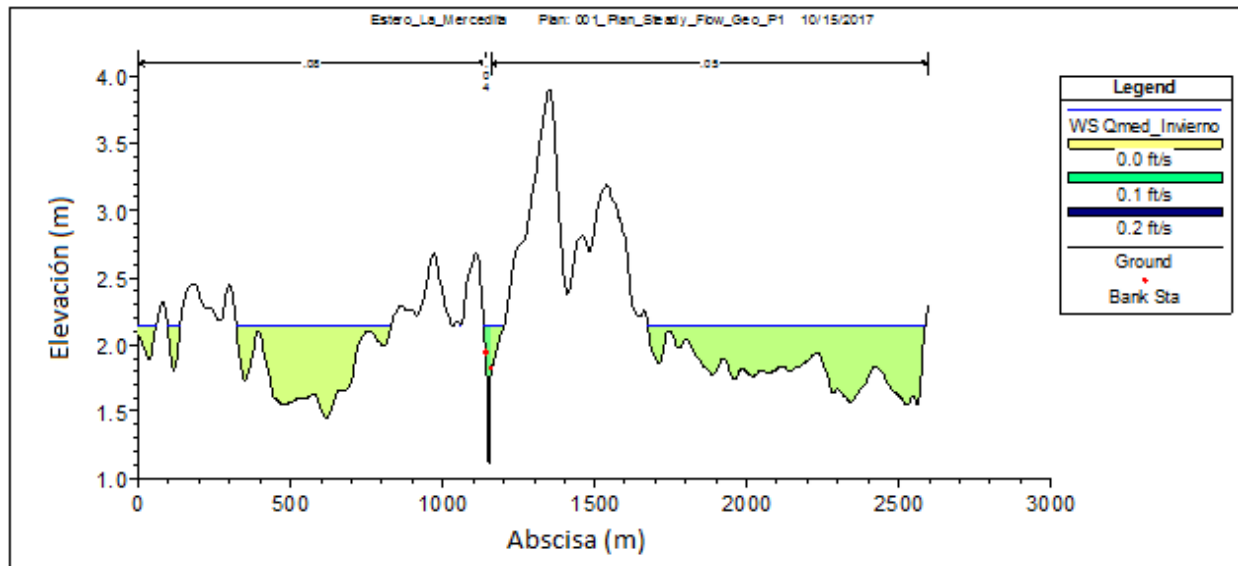
**Figura 4-38. Sección transversal del estero principal, abscisa 9 + 350.09 m. Perfiles para los caudales medio mensual de invierno y caudales de periodos de retorno de 5, 25 y 100 años.**



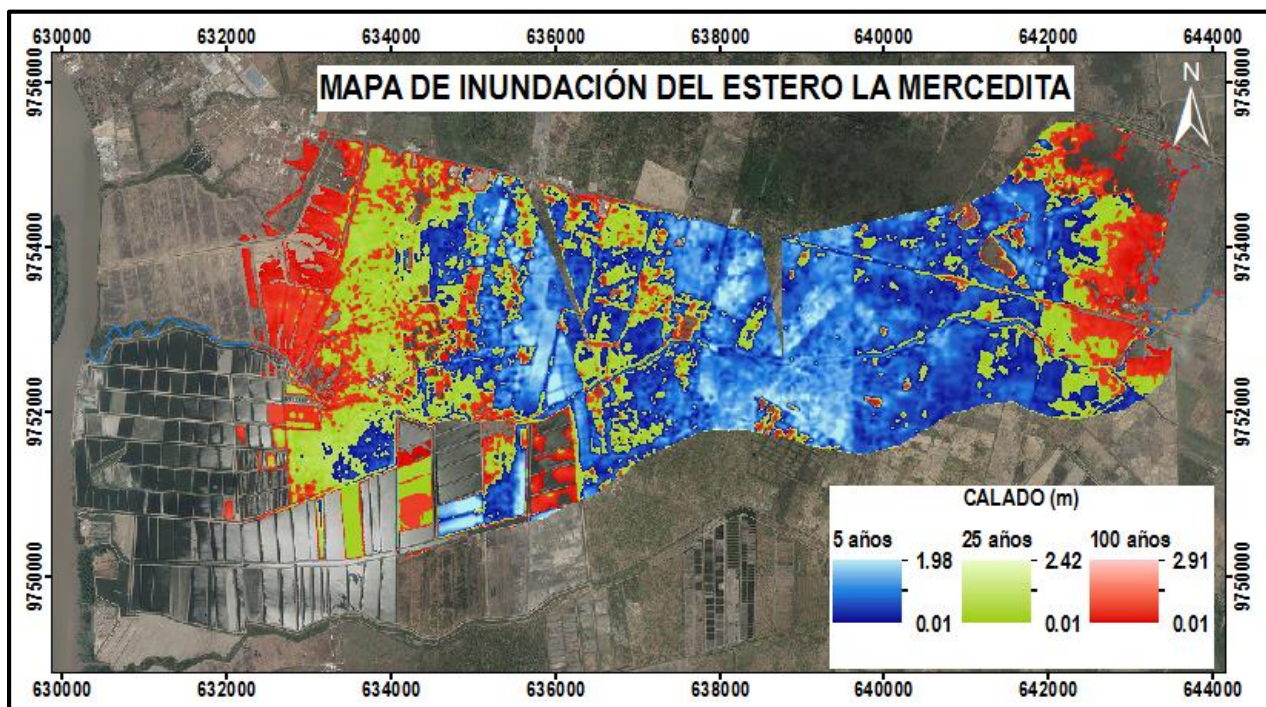
En la Figura 4-39, se presenta la distribución de velocidades del cauce principal y de las planicies de inundación en la abscisa 9+350.09 m. En la Figura 4-40, se muestra el mapa de inundación del estero La Mercedita.



**Figura 4-39.. Distribución de velocidades en el cauce principal del estero La Mercedita, para para el caudal medio de invierno. sección transversal en la abscisa 9 + 350.09 m.**



**Figura 4-40. Mapa de inundación del estero La Mercedita con caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años**



#### 4.1.2 Modelo IBER

El estero La Uruguay se encuentra ubicado en una zona industrial, mientras que el estero San Enrique 1 se encuentra en una zona urbana, debido a esto se realizó la simulación mediante el modelo IBER, a fin de evaluar con mayor precisión el comportamiento del flujo y definir zonas propensas a inundaciones. En esta sección se muestran los mapas de inundación obtenidos de la modelación bidimensional en IBER de los esteros La Uruguay y San Enrique 1 para los caudales con periodo de retorno de 5, 25 y 100 años.

##### 4.1.2.1 Estero La Uruguay

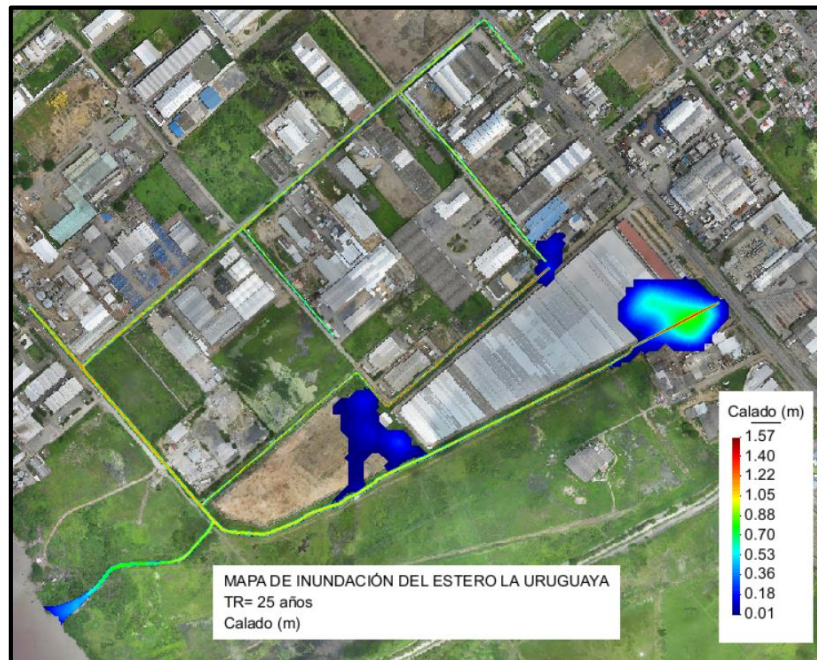
De la Figura 4-41a la Figura 4-43, se muestran los mapas de inundación del La Uruguay con caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años respectivamente.

**Figura 4-41. Mapa de inundación del estero La Uruguay con un caudal de crecida para un periodo de retorno de 5 años.**

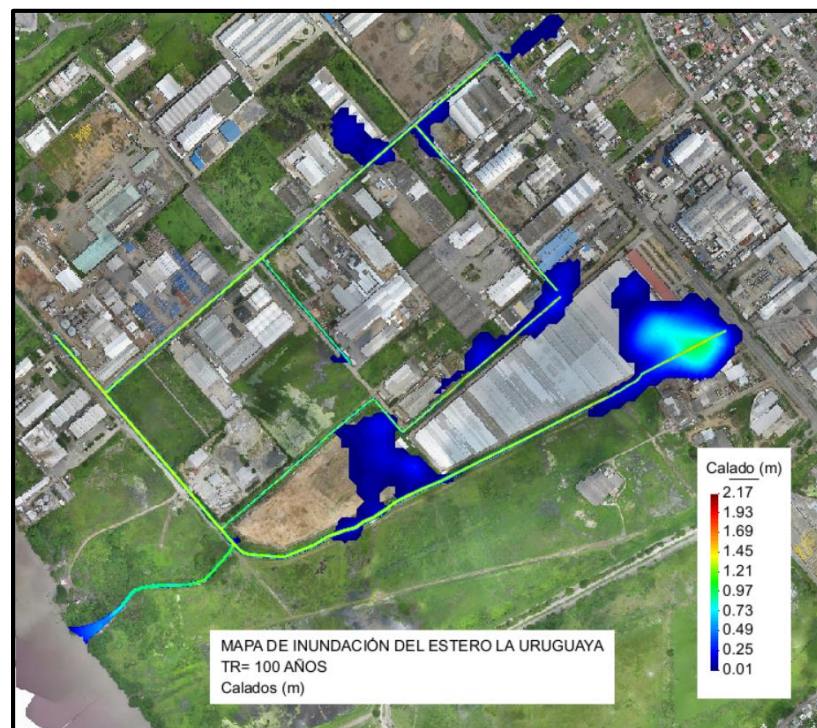




**Figura 4-42. Mapa de inundación del estero La Uruguaya con un caudal de crecida para un periodo de retorno de 25 años.**



**Figura 4-43. Mapa de inundación del estero La Uruguaya con un caudal de crecida para un periodo de retorno de 100 años.**

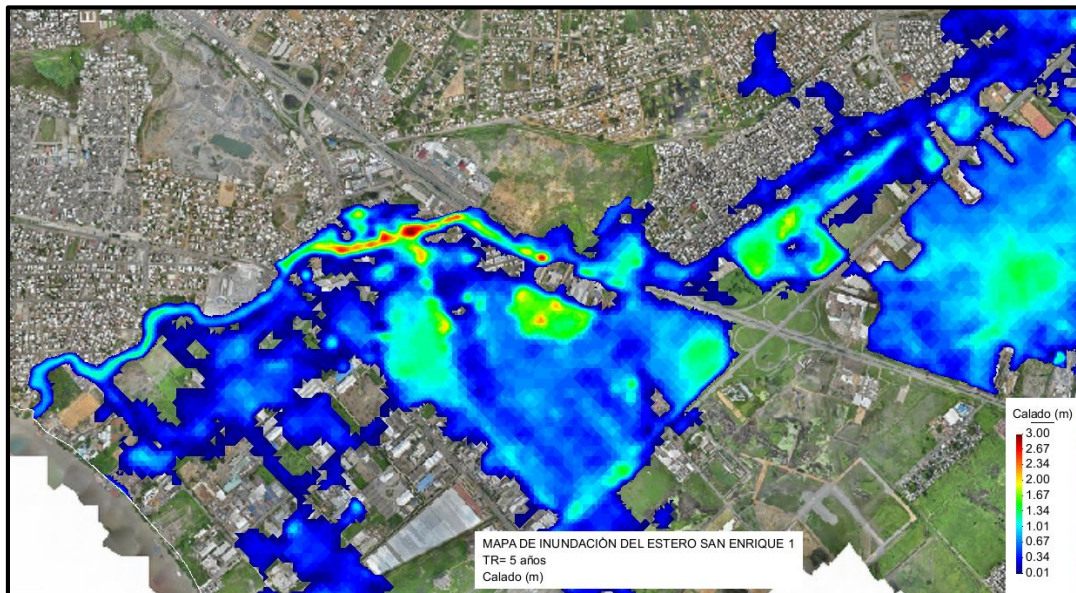




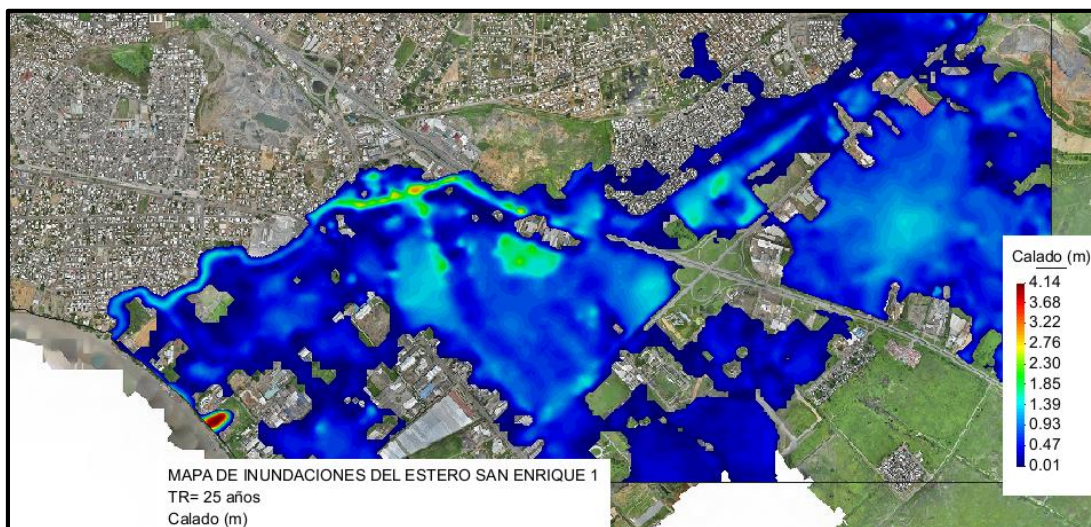
#### 4.1.2.2 Estero San Enrique 1

De la Figura 4-44 a la Figura 4-46, se muestran los mapas de inundación del estero San Enrique 1 con caudales de crecida para un periodo de retorno de 5, 25 y 100 años respectivamente.

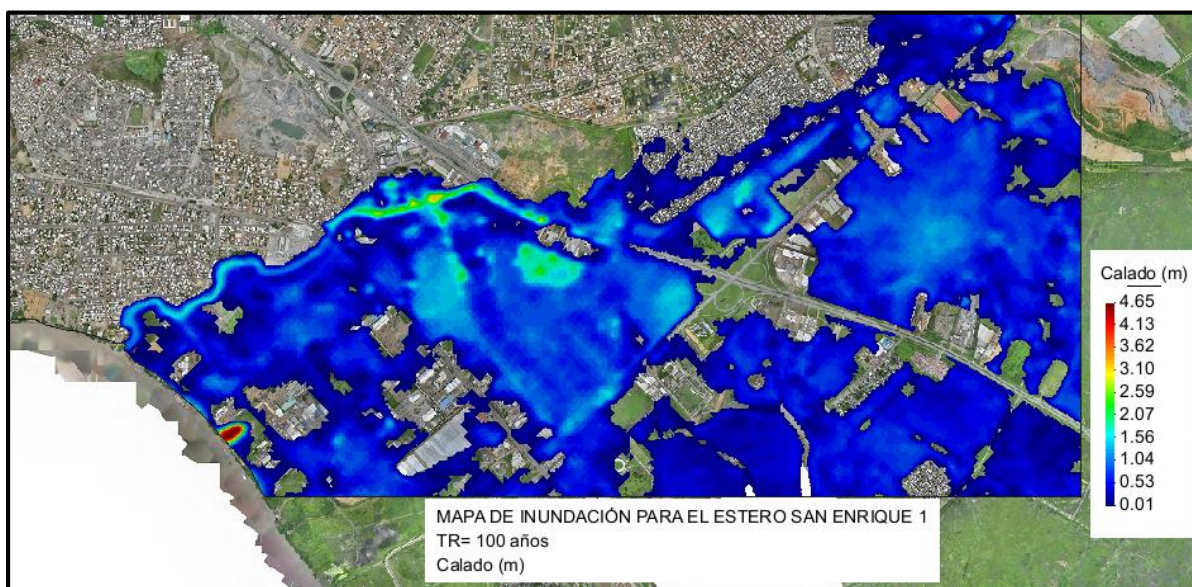
**Figura 4-44. Mapa de inundación del estero San Enrique 1 con un caudal de crecida para un periodo de retorno de 5 años.**



**Figura 4-45. Mapa de inundación del estero San Enrique 1 con un caudal de crecida para un periodo de retorno de 25 años.**



**Figura 4-46. Mapa de inundación del estero San Enrique con un caudal de crecida para un periodo de retorno de 100 años.**



## 4.2 DISCUSIÓN

### 4.2.1 Evaluación de zonas de riesgos de inundaciones

En esta sección se describen los riesgos de inundación producidos por el desbordamiento del flujo en los esteros y canales.

#### 4.2.1.1 Inundaciones por desbordamiento del cauce en el modelo HEC-RAS.

El estero La Uruguay (Figura 4-4), no presenta inundaciones alarmantes, ya que las áreas de inundación a medida que incrementa el caudal no presentan una variación significativa. Esto se debe a que las áreas de aportación son pequeñas por lo tanto son caudales pequeños. Para un caudal de  $24.1 \text{ m}^3/\text{s}$  con un periodo de retorno de 100 años se produce un calado máximo de 1.87 m y velocidades menores a 0.6 m/s, además de poseer pendientes inferiores a 0.001 m/m. Sin embargo, al ser una zona industrial, en estos canales se vierten aguas contaminadas y sedimentos provenientes de las industrias; Producto de esto, se producen olores en las áreas próximas a la zona.

En el estero Hospital (Figura 4-9), se tiene un área de aporte de  $1.07 \text{ km}^2$  que es pequeña en comparación con el resto de esteros, que aporta un caudal de  $17.4 \text{ m}^3/\text{s}$  para un periodo de retorno de 100 años. En la Figura 4-9, se observa que, para el caudal correspondiente a un periodo de retorno de 5 años, ya se produce el desbordamiento hacia las áreas aguas arriba del estero. A medida que incrementa el caudal, también el área de inundación se incrementa sin embargo para el caudal con un periodo de retorno de 100 años no se inunda toda el área de influencia del estero. Además, se observan calados de 3.75 m con un caudal de  $17.4 \text{ m}^3/\text{s}$  para un periodo de retorno de 100 años. Al realizar la evaluación hidráulica del estero para el caudal medio de invierno se observan velocidades menores a 0.06 m/s, esto se debe a que el estero tiene pendientes inferiores a 0.001 m/m.



En el estero Peñón del Río (Figura 4-14), aumenta significativamente el área de inundación a medida que aumenta el caudal, se observa que la mayoría del área de influencia de la cuenca de aporte está inundada para un caudal de 46.2 m<sup>3</sup>/s con un periodo de retorno de 100 años. El calado máximo es de 3.18 m para un caudal de 46.2 m<sup>3</sup>/s con un periodo de retorno de 100 años. Para un caudal de 12.5 m<sup>3</sup>/s con un periodo de retorno de 5 años, se evidencia el desbordamiento del cauce, lo cual provoca la inundación de las llanuras alcanzando un calado máximo de 2.18 m. En la Figura 4-13, para un caudal medio de invierno se observan velocidades muy bajas ( $v \leq 0.06$  m/s) y pendientes inferiores a 0.001 m/m, que provoca el desbordamiento de agua hacia las áreas inundables.

El estero que más caudal tiene es el estero Don Camilo, con un área de aporte de 73 km<sup>2</sup>, que aporta un caudal de 457.6 m<sup>3</sup>/s en la desembocadura del estero principal con el río Guayas para un caudal de periodo de retorno de 100 años. En la Figura 4-19, se observa que, para el caudal correspondiente a un periodo de retorno de 5 años, ya se produce el desbordamiento hacia las áreas más planas del terreno. A medida que incrementa el caudal, también el área de inundación se incrementa de tal forma que para el caudal de periodo con un retorno de 100 años casi toda el área de influencia del estero se encuentra inundada, llegando a tener calados hasta 4.99 m para un caudal con un periodo de retorno de 100 años, se puede observar velocidades muy bajas ( $v \leq 0.06$  m/s) y pendientes inferiores a 0.001 m/m.

En el estero La Matanza (Figura 4-23), se observa que casi toda el área de influencia de la cuenca de aporte está inundada considerando un caudal con un periodo de retorno de 5 años el mismo que es muy alto en comparación con otros esteros. Esto se debe a que las áreas de aportación son grandes por lo tanto los caudales son altos, además, en la Figura 4-20 se puede observar que debido a la topografía del fondo del cauce principal existe una pendiente adversa a la dirección del flujo lo que genera una especie de embalse. En el estero La Matanza se tiene velocidades del flujo ( $v \leq 0.1$  m/s), llega a tener calados de 5.6 m para un caudal con un periodo de retorno de 100 años, además de poseer pendientes inferiores a 0.00005 m/m lo que provoca el desbordamiento del agua hacia las áreas inundables.

En el estero Las Alforjas (Figura 4-27), aumenta significativamente el área de inundación a medida que aumenta el caudal, se observa que casi toda la parte norte del área de influencia de la cuenca de aporte, está inundada considerando un caudal con un periodo de retorno de 100 años, mientras que en la parte sur del estero se tiene la presencia de una montaña. En la Figura 4-24, se puede observar que debido a la topografía del fondo del cauce principal existe una pendiente adversa a la dirección del flujo lo que genera una especie de embalse. En el estero Las Alforjas se tiene velocidades del flujo ( $v \leq 0.2$  m/s), calados de 3.4 m para un caudal con un periodo de retorno de 100 años y pendientes inferiores a 0.0004 m/m.

En el estero San Enrique como se observa en las Figura 4-32 y Figura 4-36 respectivamente para el estero San Enrique 1 y San Enrique 2, el desbordamiento se produce para un caudal con un periodo de retorno de 5 años en cada caso y aumenta significativamente el área de inundación a medida que aumenta el caudal. Para el estero San Enrique 1 se puede observar velocidades bajas ( $v \leq 0.1$  m/s), calados de 4.70 m para un caudal con un periodo de retorno de 100 años y pendientes inferiores a 0.0002 m/m lo que provoca el desbordamiento de agua hacia las áreas inundables. Para el estero San Enrique 2 también se puede observar velocidades bajas ( $v \leq 0.1$  m/s), calados de 3.42 m para un caudal con un periodo de retorno de 100 años y pendientes inferiores a 0.0002 m/m.

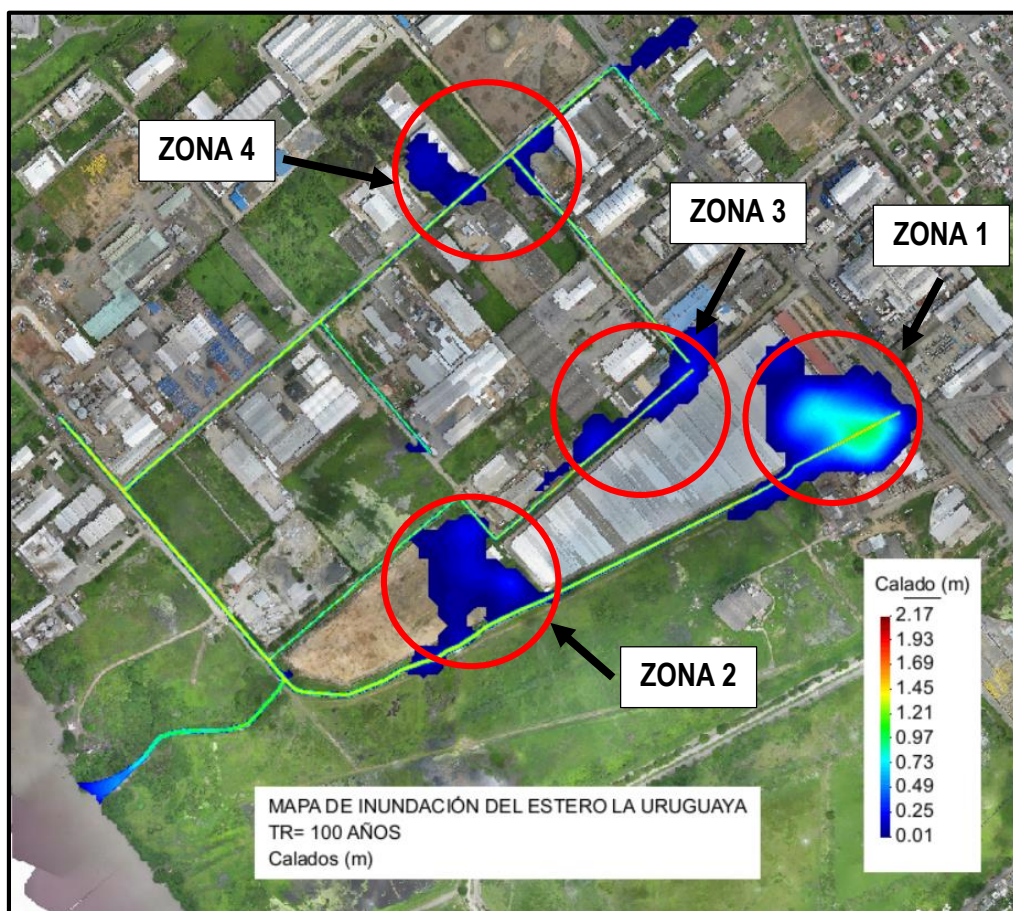
En el estero La Mercedita (Figura 4-40), se observa que se inunda gran parte de la cuenca de aporte (en su mayoría zona agrícola), para un caudal de 5 años de periodo de retorno, se tiene calados de 2.91 m. Para un caudal con un periodo de retorno de 100 años se presentan velocidades bajas ( $v \leq 0.1$  m/s) y pendientes inferiores a 0.0004 m/m.

#### 4.2.1.2 Inundaciones por desbordamiento del cauce en el modelo IBER.

La modelación numérica para el estero La Uruguaya se ha realizado sobre una malla no estructurada. Como condición de contorno se ha asignado los caudales constantes en las entradas del estero principal como en sus canales principales. Para el caudal con periodo de retorno de 5 años se evidencia que no existe mayor afectación por inundaciones, con un calado máximo de 1.23 m. Para el caudal con un periodo de retorno de 100 años se produce la mayor área de inundación, alcanzando calados de 2.17 m y velocidades menores a 0.50 m/s. En la Figura 4-47, se evidencia que la zona más afectada por el caudal para un periodo de retorno de 100 años es aguas arriba del estero principal (Zona 1).

Con los resultados obtenidos en la modelación hidrodinámica bidimensional, se identificaron 4 zonas vulnerables en base al mapa de inundación para un periodo de retorno de 100 años, el cual tiene el caudal más crítico y que provoca mayor a afectación a la población. En la Figura 4-47, se observa que existe 4 zonas del estero La Uruguaya donde se produce desbordamiento del cauce y provoca la inundación en las zonas urbanas e industriales.

**Figura 4-47. Zonas afectadas por el desbordamiento del cauce en el estero La Uruguaya para un periodo de retorno de 100 años.**



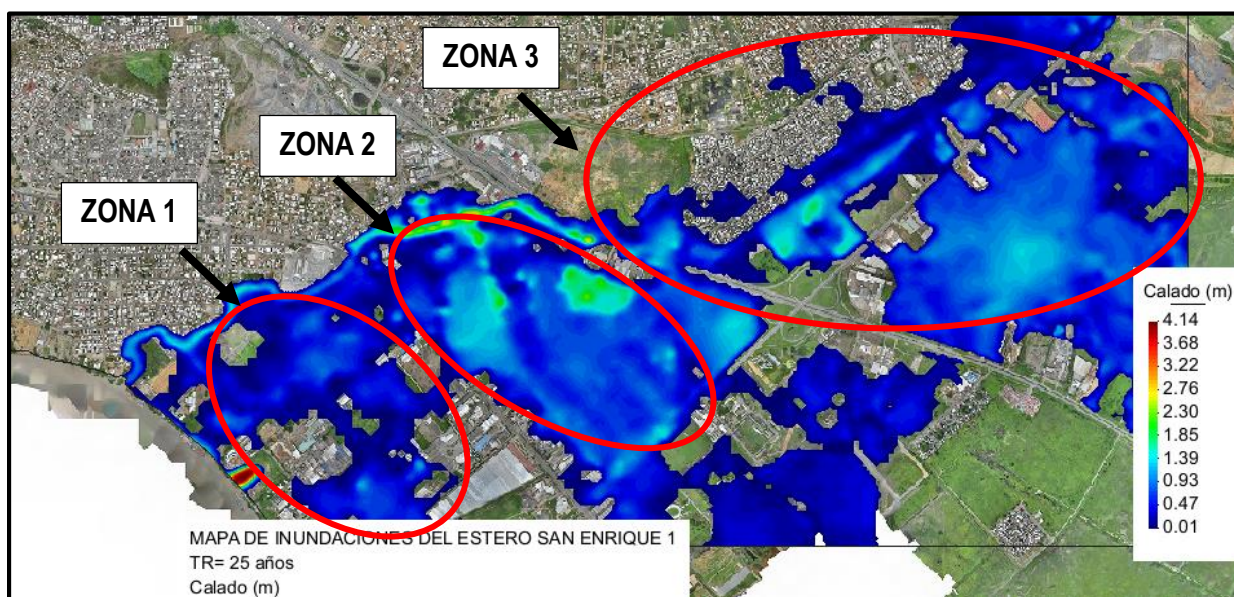
La modelación numérica para el estero San Enrique 1 se ha realizado sobre una malla no estructurada. Como condición de contorno se ha asignado los caudales constantes en las entradas del estero principal como en sus canales principales. Para el caudal con periodo de retorno de 5 años se evidencia que existe afectación por



inundaciones en gran parte de la zona urbana, alcanzando calados de 3.00 m. Para el caudal con periodo de retorno de 100 años se produce la mayor área de inundación, alcanzando calados de 4.65 m y velocidades menores a 0.50 m/s. En la Figura 4-48, se evidencia que las zonas 1, 2 y 3 se ven afectadas por el caudal para un periodo de retorno de 25 años, esto se debe a que las pendientes son bajas y no permite la circulación del flujo hacia aguas abajo del estero principal.

En el estero San Enrique 1 se identificaron 3 zonas vulnerables en base al mapa de inundación para un periodo de retorno de 25 años, donde se produce el desbordamiento del cauce y provoca la inundación en las zonas urbanas.

**Figura 4-48. Zonas afectadas por el desbordamiento del cauce en el estero San Enrique 1 para un periodo de retorno de 25 años.**



#### 4.2.2 Validación y comparación de los modelos en 1-D y 2-D para la generación de mapas de inundación.

En la modelación de los 8 esteros del cantón Durán en estado natural, la topografía no presenta cambios de geometría abruptos que influyan de manera considerable en los coeficientes de expansión y contracción en el caso unidimensional (HEC-RAS). En el caso bidimensional (IBER), tomando en cuenta que la malla es no estructurada con tamaño de celda que van desde 1 m hasta 20 m y que las variables de cálculo temporales por defecto han permitido una convergencia del modelo; se ha disminuido la incertidumbre o aumentado la sensibilidad de los resultados obtenidos.

La validación y/o comparación de resultados de la modelación se ha realizado únicamente para los esteros La Uruguay y San Enrique1. Se han evaluado comparando las áreas de inundación y los niveles de flujo en IBER y HEC-RAS para diferentes caudales de periodo de retorno como lo indica Ayala (2014); Castro *et al.* (2011); Ochoa *et al.* (2016).

En la Tabla 4-1, se muestran los niveles de flujo y en la Tabla 4-2, se muestra las áreas de inundación obtenidas de los mapas de inundación del estero La Uruguay para los caudales con periodos de retorno de 5, 25 y 100 años.



**Tabla 4-1. Comparación de niveles máximos de flujo obtenidos en HEC-RAS e IBER.**

Periodo de retorno	La Uruguaya		
	HEC-RAS Calado (m)	IBER Calado (m)	Diferencia (m)
5 años	1.14	1.23	0.09
25 años	1.53	1.57	0.04
100 años	1.87	2.17	0.3

**Tabla 4-2. Comparación de áreas de inundación obtenidos en HEC-RAS e IBER.**

Periodo de retorno	La Uruguaya		
	HEC-RAS Área (ha)	IBER Área (ha)	Diferencia (ha)
5 años	3.62	3.78	0.16
25 años	8.12	8.26	0.14
100 años	24.36	21.82	2.54

En la Tabla 4-3, se muestran los niveles de flujo y en la Tabla 4-4, se muestra las áreas de inundación obtenidas de los mapas de inundación del estero San Enrique 1 para los caudales con periodos de retorno de 5, 25 y 100 años.

**Tabla 4-3. Comparación de niveles máximos de flujo obtenidos en HEC-RAS e IBER.**

Periodo de retorno	San Enrique 1		
	HEC-RAS Calado (m)	IBER Calado (m)	Diferencia (m)
5 años	3.72	3.00	0.72
25 años	4.25	4.14	0.11
100 años	4.70	4.65	0.05

**Tabla 4-4. Comparación de áreas de inundación obtenidos en HEC-RAS e IBER.**

Periodo de retorno	San Enrique 1		
	HEC-RAS Área (ha)	IBER Área (ha)	Diferencia (ha)
5 años	123.33	143.48	20.15
25 años	244.61	268.74	24.13
100 años	325.47	360.12	34.65

En la Tabla 4-1, se observa que los niveles máximos de flujo obtenidos de los mapas de inundación del estero La Uruguaya son similares, dando una diferencia máxima de 0.30 m y una mínima de 0.04 m. En la Tabla 4-2, se observa que las áreas de inundación para 5 y 25 años son similares, mientras que las áreas de inundación para 100 años tienen una diferencia de 2.54 ha.

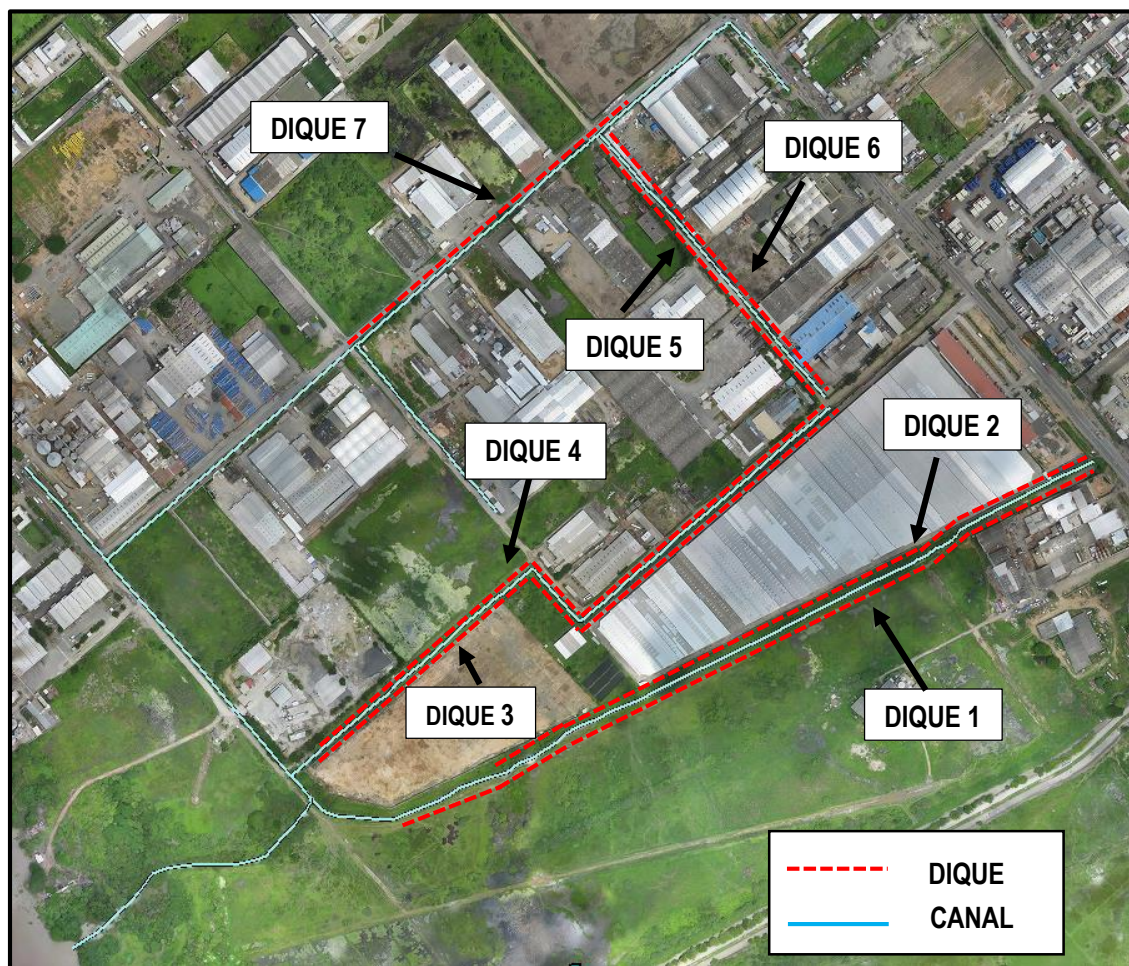
En la Tabla 4-3, se observa que los niveles máximos del flujo obtenidos de los mapas de inundación del estero San Enrique 1 tienen una variación considerable, dando una diferencia máxima de 0.72 m para un caudal con un periodo de retorno de 5 años y una mínima de 0.05 m para un caudal con un periodo de retorno de 100 años.

En la Tabla 4-4., se observa que las áreas de inundación son mayores para el modelo bidimensional IBER, con una diferencia máxima de 34.65 ha y una mínima de 20.15 ha. Esto se debe a que los modelos bidimensionales toman en cuenta la dirección de las ondas del flujo en las dos direcciones (x y y) por lo que producen una mayor área de inundación; y dependerá, de la cantidad de flujo (a mayor caudal mayor velocidad).

#### 4.2.3 Alternativas para el adecuado funcionamiento del sistema hidráulico de los esteros La Uruguaya y San Enrique 1.

En base a la identificación de zonas vulnerables en el mapa de inundación con periodo de retorno de 100 años, se planteó la ubicación de diques en las 4 zonas de riesgo del estero La Uruguaya mencionadas anteriormente. La zona 1 es la más vulnerable a inundaciones, afectando a un área considerable de la zona industrial. En la Figura 4-49, se muestra la ubicación de los diques en el estero La Uruguaya.

*Figura 4-49. Ubicación de diques en el estero La Uruguaya.*

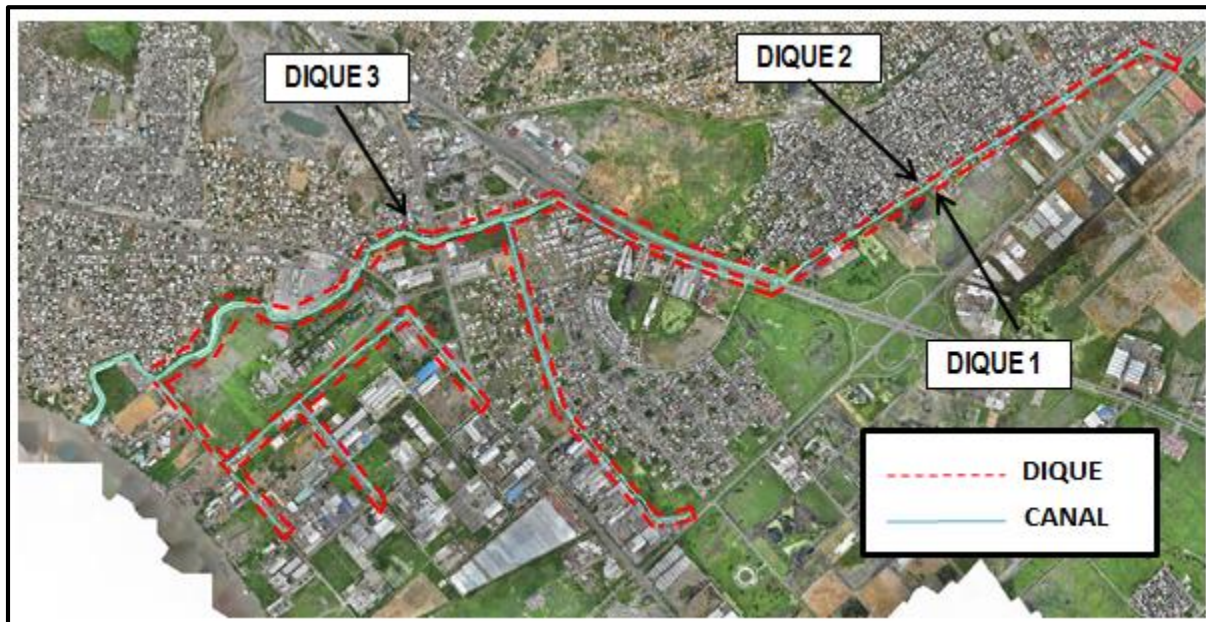


De la misma forma para el estero San Enrique 1, se planteó la ubicación de diques en las 3 zonas vulnerables, ya que presentan una gran área de inundación en la zona urbana e industrial. Para este caso, se implementó la ubicación de 3 diques en las zonas de riesgo para un periodo de retorno de 25 años, esto debido a que, para un periodo de retorno de 100 años se requiere la ubicación de diques con alturas mayores a 3 metros en todos los



márgenes izquierdo y derecho del estero principal y canales artificiales, lo cual no es factible debido a que el análisis tendría un coste computacional muy elevado. En la Figura 4-50, se muestra las coordenadas y dimensiones de los diques para el estero San Enrique 1.

**Figura 4-50. Ubicación de diques en el estero San Enrique 1.**



En la Tabla 4-5, se muestra las coordenadas y dimensiones de los diques en el estero La Uruguay y San Enrique 1.

**Tabla 4-5. Descripción de los diques en el estero La Uruguay y San Enrique 1.**

		Diques					
Estero	Dique	Coordenada Inicial (m)		Coordenada Final (m)		Ancho (m)	Altura (m)
		Este	Norte	Este	Norte		
La Uruguaya	Dique 1	630895.0	9757500.0	629896.0	9757030.0	1	1.5
	Dique 2	630883.0	9757510.0	630017.0	9757070.0	1	1.5
	Dique 3	630549.0	9757570.0	629850.0	9757100.0	1	2.5
	Dique 4	629844.0	9757110.0	629850.0	9757100.0	1	2.5
	Dique 5	630531.0	9757580.0	620237.0	9757920.0	1	1.5
	Dique 6	630549.0	9757570.0	630539.0	9757580.0	1	1.5
	Dique 7	630325.0	9758020.0	630183.0	9757890.0	1	1.5
San Enrique 1	Dique 1	633371.0	9759640.0	628922.0	9758150.0	1	3
	Dique 2	631100.0	9758930.0	628879.0	9758590.0	1	3
	Dique 3	632099.0	9758930.0	631100.0	9758320.0	1	3

Una vez ubicados los diques en las coordenadas mencionadas anteriormente, se realizó la simulación en el modelo IBER. En la Figura 4-51, se observa que al implementar los diques en las zonas 1, 2, 3 y 4 del estero La Uruguay se logra controlar el desbordamiento del cauce hacia la zona industrial y urbana. Además, se observa que, al



incorporar los diques, el flujo se tiende a embalsar en los canales lo que provoca calados mayores a los obtenidos en la simulación del estero en su estado natural, alcanzando calados de 2.65 m y velocidades menores a 1.50 m/s.

**Figura 4-51. Mapa de inundación del estero La Uruguaya con la implementación de diques.**



Se observa que al implementar los diques en las zonas 1, 2, y 3 del estero San Enrique 1 se logra controlar el desbordamiento del cauce hacia la zona urbana. Además, se observa que, al incorporar los diques, el flujo se tiende a embalsar en los canales lo que provoca calados mayores a los obtenidos en la simulación del estero en su estado natural, alcanzando calados de 4.40 m y velocidades menores a 1.50 m/s.

**Figura 4-52. Mapa de inundación del estero San Enrique 1 con la implementación de diques.**



## 5 CAPITULO 5: CONCLUSIONES

De la modelación matemática del flujo en el modelo hidrodinámico en 1-D se han obtenido resultados de los cuales se puede concluir lo siguiente:

- Los resultados del mapeo de inundaciones muestran que debido a las características topográficas de la zona de estudio existen una diferencia muy pequeña entre los eventos de crecida de 5, 25 y 100 años para los esteros Don Camilo, La Matanza, La Mercedita y Peñón del Río, por lo tanto, se puede asumir que el normal funcionamiento de los esteros y canales mencionados no es el adecuado.
- De los resultados analizados, el estero La Matanza es el que más afección causa a la zona urbana del cantón Durán debido a un área extensa de inundación, ya que tiene una capacidad de transporte de flujo mínima aguas arriba del modelo; igual capacidad se observa en los canales tributarios y en algunos canales principales (menor a  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Aguas abajo del modelo, la capacidad del cauce es muy alta permitiendo evacuar caudales mayores.
- Los resultados de los modelos hidráulicos y los mapas de inundación permiten identificar zonas críticas, en los cuales se deberían realizar un manejo adecuado mediante la adopción de medidas estructurales o no estructurales con el objetivo de disminuir o mitigar el riesgo de inundación en zonas agrícolas y especialmente en zonas urbanas.
- El estero La Uruguay es el de menor afectación debido a que sus áreas de aporte son pequeñas, por lo tanto, sus caudales son bajos. En la modelación 1-D y 2-D para un caudal de  $24.1 \text{ m}^3/\text{s}$  con un periodo de retorno de 100 años, se evidenció similares zonas de afectación con el desbordamiento del cauce, principalmente aguas arriba del cauce principal.
- La variable de mayor importancia en la calibración de un flujo a superficie libre es la rugosidad o resistencia que se ejercen las paredes y el fondo del canal en el flujo. Para el área que se estudió se presentaron rugosidades altas, esto debido al alto contenido de vegetación que se encuentra en la zona, lo que a su vez provoca el estancamiento del flujo.
- Al tener varios tramos del estero La Matanza y Peñón del Río se tiene pendientes bajas y la presencia de contrapendientes se provoca el embalsamiento del flujo que con el tiempo termina llegando a sobrepasar la capacidad el estero y provocando zonas de inundación.

De los resultados obtenidos con la modelación matemática del flujo de los esteros La Uruguay y San Enrique 1 realizada en condiciones naturales y con la incorporación de diques, mediante los modelos 1-D y 2-D, se puede concluir lo siguiente:

- Los niveles de flujo de los caudales modelados en HEC-RAS e IBER tiene algunas diferencias considerables para el estero San Enrique 1 y para el estero La Uruguay, esto debido a que la información topográfica disponible no tiene la precisión adecuada. Las áreas de inundación presentan mayor variación, esto debido a la capacidad de cálculo de cada modelo. En el caso de los modelos bidimensionales consideran la dirección de las ondas de flujo que tienen mayor influencia en los resultados da mayor velocidad; en cambio los modelos unidimensionales consideran que la velocidad es constante en toda la sección transversal, a lo largo del cauce o eje del río.

- Se puede observar que las ubicaciones de diques en las márgenes de los esteros nos ayudan a controlar el área de inundación, sin embargo, no es suficiente para mitigar el área de afección que producen las inundaciones en zonas urbanas.
- Mediante la modelación bidimensional se pudo apreciar de mejor forma el evento de inundación en los esteros La Uruguay y San Enrique 1. En la comparación de los mapas de inundación en su estado natural y con la implementación de diques se evidenció con mayor claridad la diferencia de áreas inundadas entre un mapa y otro, de esta forma se comprendió la ventaja que tienen los modelos bidimensionales ante la modelación unidimensional, permitiendo dar solución a la problemática de una manera eficaz.
- El tiempo requerido de simulación en HEC-RAS para poder obtener los respectivos mapas de inundaciones, fue considerablemente menor que el tiempo demandado por IBER que fue cercano a 12 horas para cada estero, este tiempo se incrementa por el tamaño y calidad de la malla a calcular, como también por el caudal de entrada. La diferencia en los tiempos de análisis reside en la forma que IBER realiza el cálculo de las ecuaciones de la conservación de la masa y cantidad de movimiento, este análisis lo realiza por el método de volúmenes finitos que integra las ecuaciones diferenciales para cada celda constitutiva de la malla, estas integraciones son la causa por lo cual el tiempo es mucho mayor al necesitado por HEC-RAS.
- IBER, por su método de análisis, que lo realiza sobre volumen finitos permite que el agua fluya en función de la superficie de estudio (malla), que se encuentra interconectada, permitiendo tener una mejor apreciación del fenómeno bidireccional que se produce en los esteros y canales, obteniéndose zonas de inundación más amplias no estando limitadas a secciones transversales.

## 5.1 RECOMENDACIONES

- Es recomendable que los gobiernos locales, luego de un evento de crecida, realicen un mapeo inmediato de las zonas afectadas por inundaciones, este tipo de información será útil a futuro en la validación de los mapas de inundación obtenidos en los modelos hidrodinámicos.
- Si existe la presencia de elementos estructurales como alcantarillas, puentes y diques lo más recomendable para estas condiciones es usar modelos 2-D y 3-D que nos permiten de manera eficaz incluir estos elementos al modelo hidrodinámico y tener resultados más próximos a la realidad.
- En el proceso de evaluación del cauce sería de interés incorporar mejoras en la representación numérica, se pueden agregar a las herramientas existentes la simulación de transporte de sedimentos y calidad de agua, se puede obtener una mejor representación del MDE (Modelo Digital de Elevación) de la zona de estudio y de las estructuras existentes y sus efectos en el flujo que no fueron tomados en este estudio. Es de importancia saber que al incorporar estas mejoras se requerirá un mayor esfuerzo computacional, los cuales derivaran en un mayor tiempo y costo del análisis, esto dependerá de la importancia del proyecto y de los resultados a los que se pretenda llegar.
- Es muy importante contar con topografía a detalle, ya que, al ser un terreno plano, un ligero cambio en altura, cambia el relieve del terreno, alterando el comportamiento de las variables físicas del modelo que pueden generar variaciones significativas en los resultados.



## 6 REFERENCIAS

- Ayala, J. (2014). Modelamiento hidráulico bidimensional, para la determinación de planos de inundación de Quillacollo, 41.
- Bladé, E., Cea, L., & Corestein, G. (2014). Numerical modelling of river inundations. *Ingeniería Del Agua*, 18(1), 68.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., and Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo Y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1–10.
- Bladé Castellet, E., & Gómez Valentín, M. (2006). Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado en una y dos dimensiones., 230.
- Calzas Pérez, M. (2013). Modelización del canal de la planta TEL en la U . P . T . de As Pontes., 100.
- Castro, L. T., & Willems, P. (2011). Desempeño de modelos hidráulicos 1D y 2D para la simulación de inundaciones. *Maskana*, 2(1), 91–98.
- Cea, L. (2005). An unstructured finite volume model for unsteady turbulent shallow water flow with wet-dry fronts: numerical solver and experimental validation, *PhD thesis*, thesis doctoral, Universidad de la Coruña, 248.
- Cea, L., & Bladé, E. (2007). Modelización matemática en lecho fijo del flujo en ríos. Modelos 1D y 2D en régimen permanente y variable. *Grupo GIAMA*, 1–30.
- Cea, L., Puertas, J., Vázquez, M., & Cendón, E. (2009). Evaluación de corrientes litorales y frentes de marea mediante bidimensional en ríos y desembocadura de ríos, 16(1).
- Chow, V. Te. (1994). Hidráulica de Canales abiertos. *Editorial Mc. Graw Hill*.
- Cuervo, A. (2012). Comparación de los modelos hidráulicos unidimensional (HEC-RAS) y bidimensional (IBER) en el análisis del rompimiento de presas de materiales sueltos. *Tesis de Maestría*, 72.
- Fe Marqués, J. (2005). Aplicación del método de volúmenes finitos a la resolución numérica de las ecuaciones de aguas someras con incorporación de los esfuerzos debidos a la turbulencia, 242.
- Flumen. (2010). Manual Básico De Iber.
- FLUMEN. (2003). Manual De Referencia, 1–17.
- Matsuda, I. (2004). River Morphology And Channel Processes. *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, 12.
- Ochoa, S. A., Reyna, T., Reyna, S., García, M., Patalono, A., & Labaque, M. (2014). Evaluación de modelos hidrodinámicos para representar flujos en cauces naturales. *Maskana*, 5(November 2014), 83–95.
- Ochoa, S., Reyna, T., Reyna, S., García, M., Labaque, M., & Díaz, J. M. (2016). Modelación hidrodinámica del tramo medio del río Ctlamochita, provincia de Córdoba. *Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*, 3(2), 95–101.
- PROMAS. (2016). Estudio para el levantamiento de línea base y propuesta de reordenamiento del sistema hidráulico del cantón Durán y diseño de la recuperación paisajística de un canal de aguas lluvias, 27.
- Sánchez, J., & Maza, J. (1985). Morfología de ríos. *Morfología de Ríos*.
- USGS. (1998). Surface-water field techniques training class. Report 98-4252, U.S. Geological Survey Water-Supply, U.S.A.

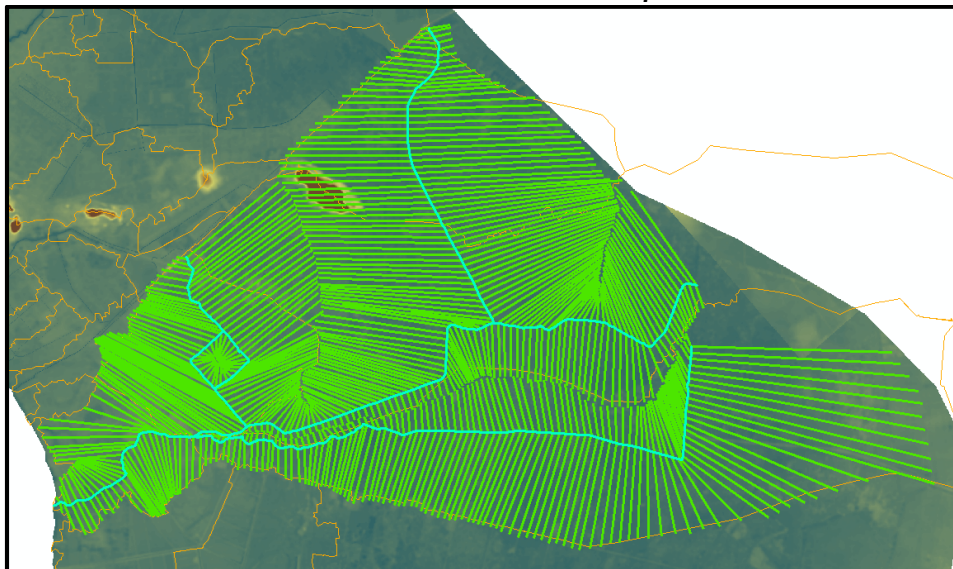




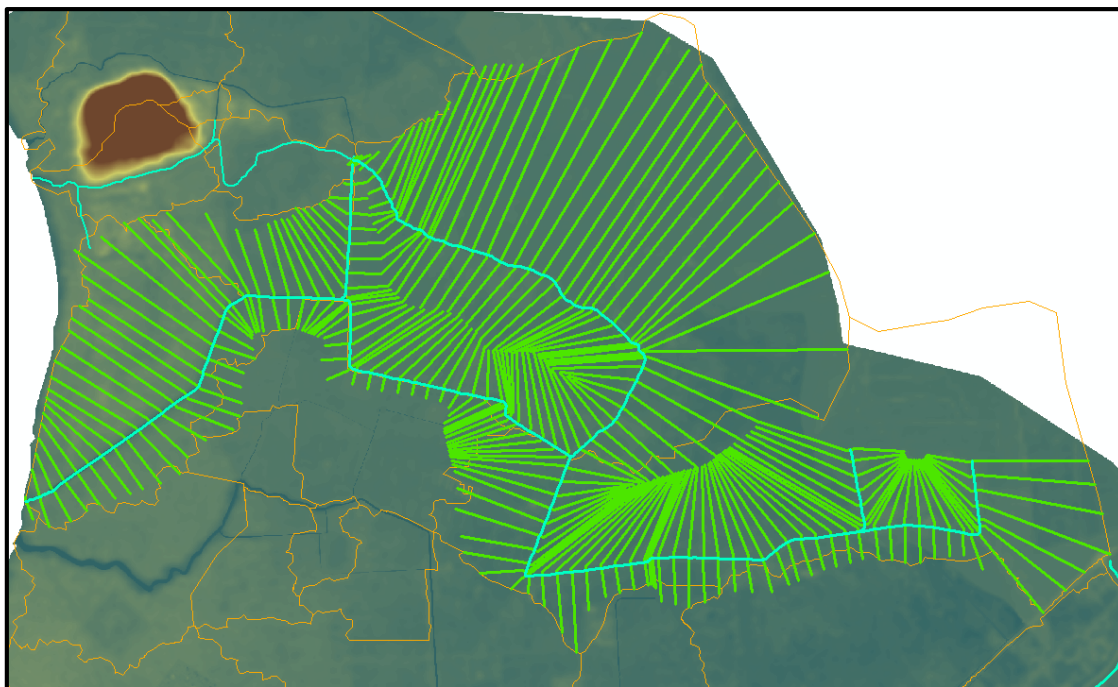
- Villazón, M. F., Timbe, L. M., & Willems, P. (2013). Comparative analysis of 1-D river flow models applied in a quasi 2-D approach for floodplain inundation prediction, 4(1), 107–126.
- Willems, P. (2012). Model uncertainty analysis by variance decomposition. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 42 - 44:21 - 30. Estimating and representing uncertainty in applied hydrology, hydraulics and water quality studies.

## ANEXOS

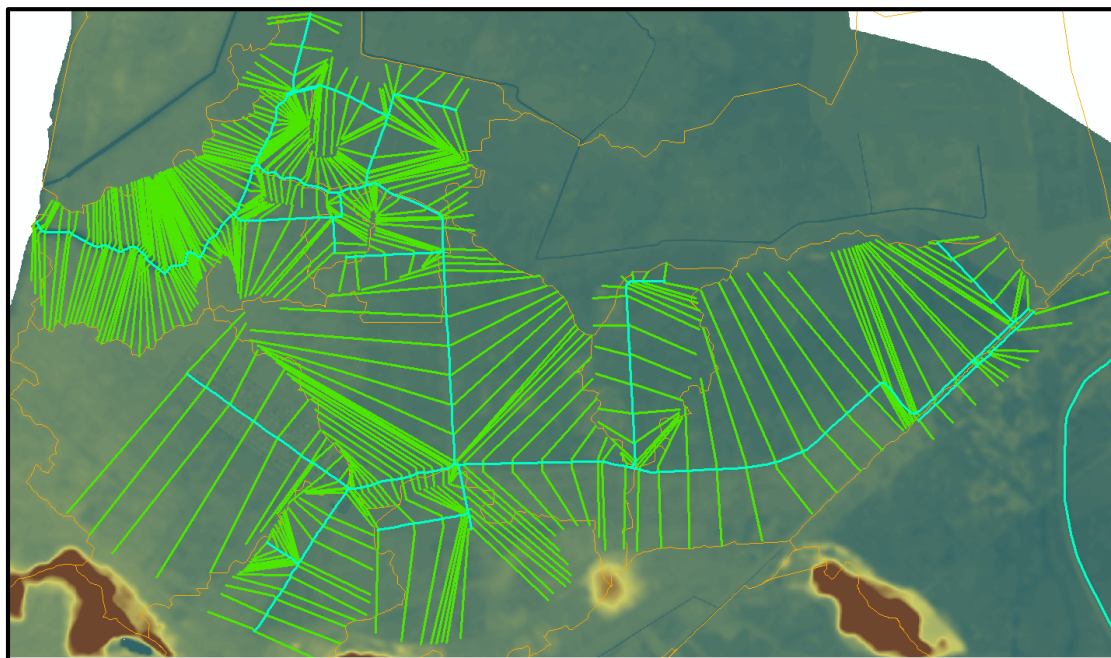
## Anexo A: Secciones transversales para el modelo unidimensional.

*Figura A-1. Secciones transversales del estero Don Camilo para el modelo unidimensional.**Figura A-2. Secciones transversales del estero La Uruguayaya para el modelo unidimensional.*

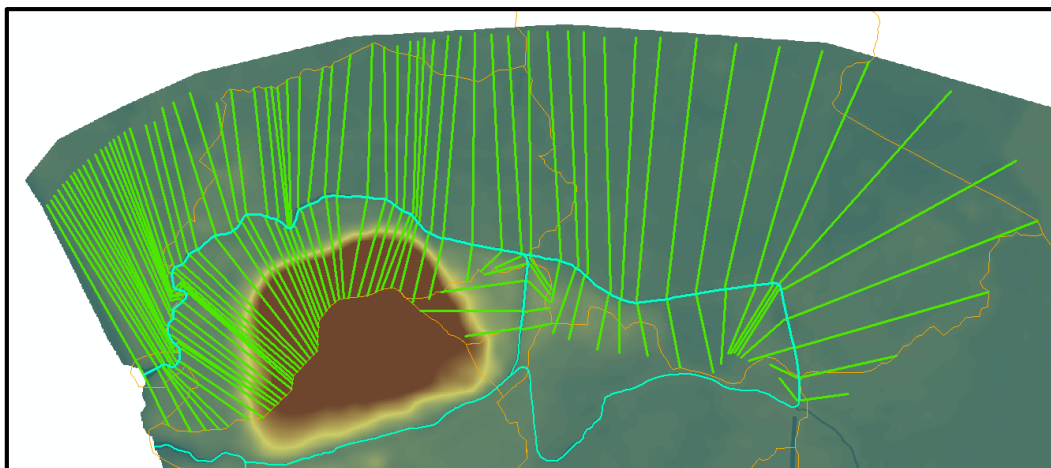
**Figura A-3. Secciones transversales del estero Peñón del Río para el modelo unidimensional.**



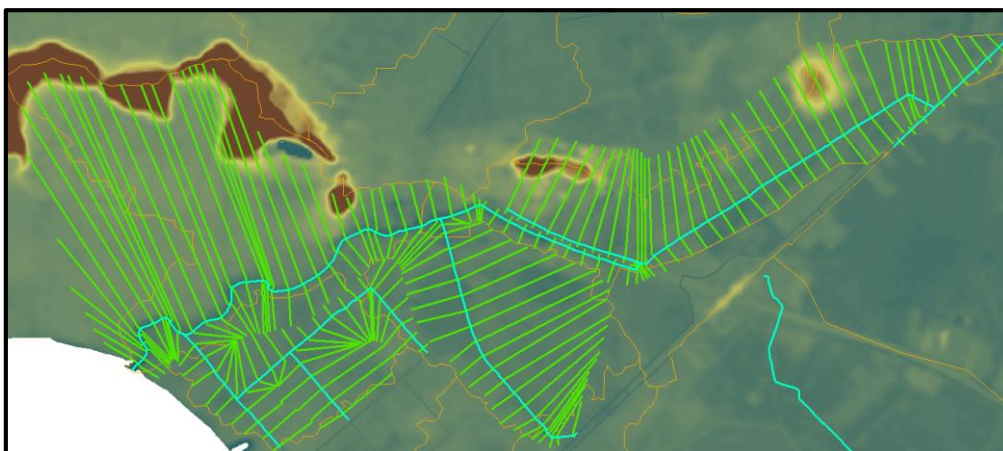
**Figura A-4. Secciones transversales del estero La Matanza para el modelo unidimensional.**



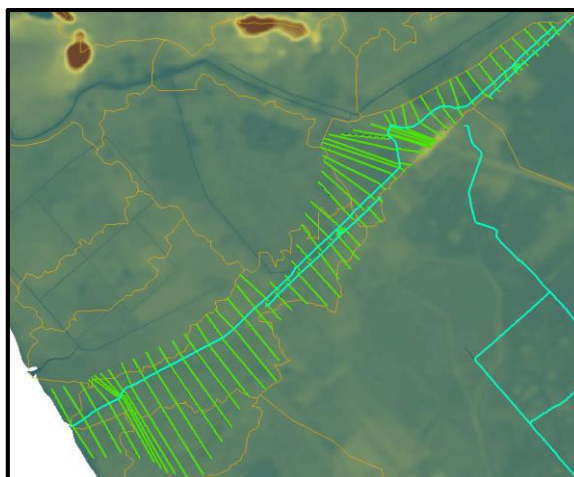
**Figura A-5. Secciones transversales del estero Las Alforjas para el modelo unidimensional.**



**Figura A-6. Secciones transversales del estero San Enrique 1 para el modelo unidimensional.**



**Figura A-7. Secciones transversales del estero San Enrique 1 para el modelo unidimensional.**



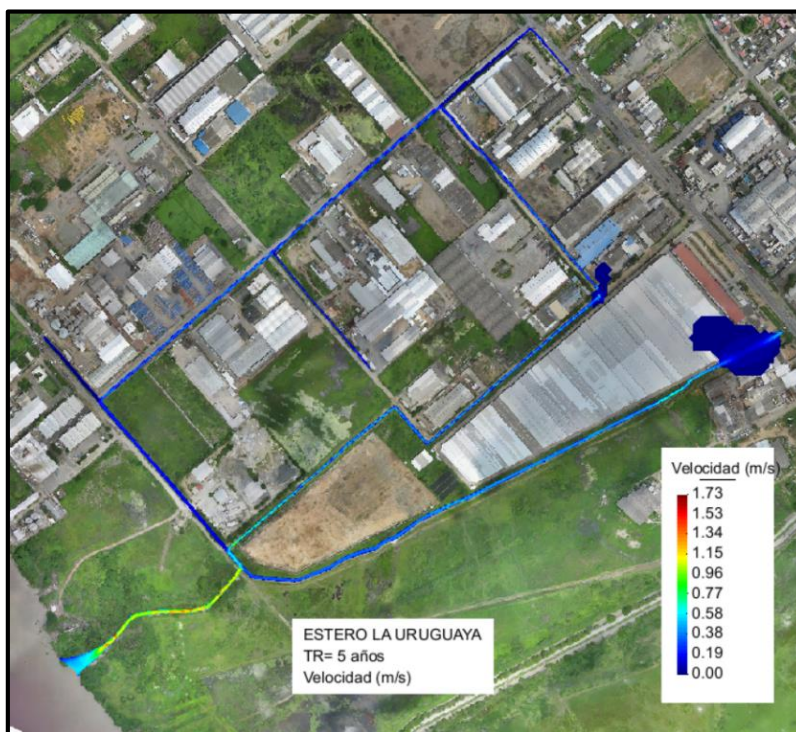


**Figura A-8. Secciones transversales del estero La Mercedita para el modelo unidimensional.**

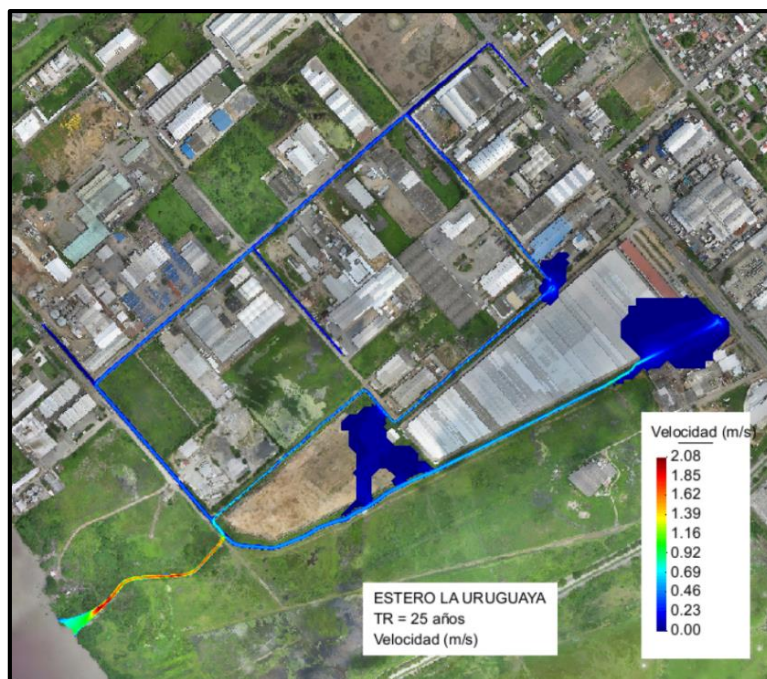


**Anexo B: Velocidades de los esteros La Uruguaya y San Enrique 1 en el modelo bidimensional.**

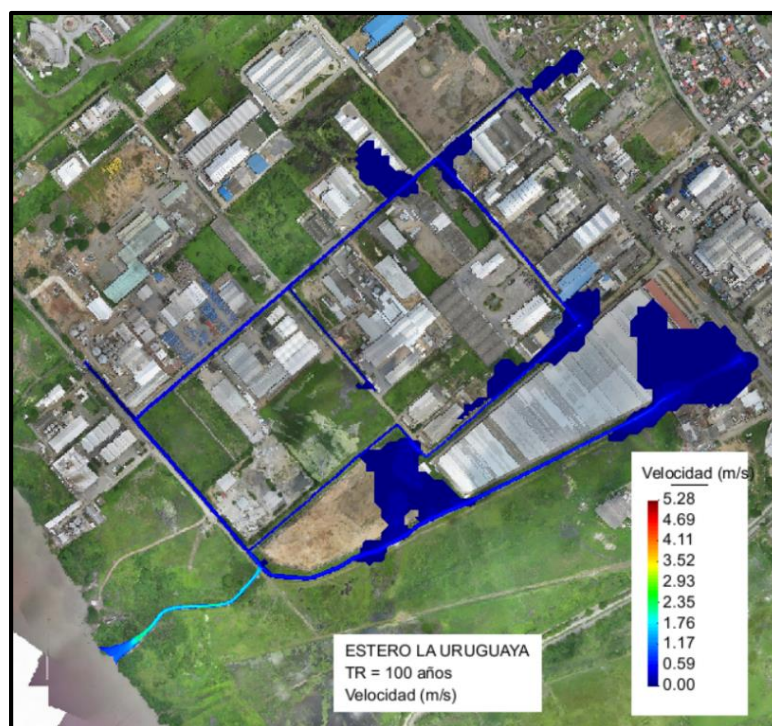
**Figura B-1. Velocidades del estero La Uruguaya para un caudal con un periodo de retorno de 5 años.**



**Figura B-2. Velocidades del estero La Uruguaya para un caudal con un periodo de retorno de 25 años.**



**Figura B-3. Velocidades del estero La Uruguaya para un caudal con un periodo de retorno de 100 años.**





**Figura B-4. Velocidades del estero La Uruguaya con diques para un caudal con un periodo de retorno de 100 años.**



**Figura B-5. Velocidades del estero San Enrique 1 para un caudal con un periodo de retorno de 5 años.**





**Figura B-6. Velocidades del estero San Enrique 1 para un caudal con un periodo de retorno de 25 años.**



**Figura B-7. Velocidades del estero San Enrique 1 para un caudal con un periodo de retorno de 100 años.**



**Figura B-8. Velocidades del estero San Enrique 1 para un caudal con un periodo de retorno de 25 años con la implementación de los diques.**

